

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
"LA SAPIENZA"



FACOLTA' DI INGEGNERIA

*Tesi di laurea in
Ingegneria dei materiali*

**SCELTA DEI MATERIALI ED ANALISI STRUTTURALE PER
SUPPORTI DI RIVELATORI DI PARTICELLE DELL'ESPERIMENTO
BTev A FERMILAB (U.S.A.)**

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Ferdinando Felli

Laureando:
Emanuele Basile
Matricola 09105864

Correlatore:
Chiar.mo Prof.
Antonio Paolozzi

Relatore esterno
Ing.
Sandro Tomassini

Anno Accademico 2001/2002

INDICE

PARTE PRIMA	5
INTRODUZIONE.....	6
PROGETTO BTeV	9
1.1 Il Progetto BTeV	10
1.2 Cenni storici.....	12
1.3 Modello standard e violazione del CP in BTeV.....	15
BTeV: DESCRIZIONE DEI SUOI COMPONENTI.....	19
2.1 Beam-pipe	21
2.2 Pixel detector	22
2.4 BTeV Ring Imaging Cerenkov Counter (RICH).....	27
2.5 Calorimetro elettromagnetico (PbWO₄).....	30
2.6 Sistema Muonico	34
2.6 Dispositivi e software per la rielaborazione dei dati raccolti.....	38
PARTE SECONDA.....	45
PRINCIPALI MATERIALI UTILIZZATI.....	46
3.1 Rohacell.....	47
3.2 Composito: matrice epossidica con rinforzo in fibra di carbonio	51
3.2.1 Definizione del materiale	52
3.2.2 Caratteristiche fisiche.....	53
3.2.3 Condizioni di test	53
3.2.5 Tenacità a frattura (Microstrain).....	55
3.2.6 Tenacità con carichi statici.....	56
3.3 Lega di alluminio: Anticorodal.....	58
3.4 Kapton.....	59
3.5 Parylene.....	60
3.6 Lunghezza di radiazione.....	61

MICROSTRIPS E STRAW TUBES	63
4.1 Rivelatori strip in silicio (microstrip).....	64
4.2 Straws: Cavità cilindriche a spostamento.....	70
4.2.1 Straws in BTeV	72
4.3 Descrizione delle parti costituenti gli straws	74
4.3.1 End-plate	75
4.3.2 End-plugs	77
4.3.3 Terminali per i filamenti di tungsteno.....	79
4.3.4 Twisters.....	80
4.3 Caratterizzazione meccanica degli straws	81
PARTE TERZA.....	86
ANALISI DELLE ALTERNATIVE AL SUPPORTO PER STRAWS E FASI DI ASSEMBLAGGIO DELL'INTERFACCIA	87
5.1 Soluzione americana	88
5.2 Possibili alternative studiate in Italia.....	91
5.2.1 Soluzione con sezione a "Z"	91
5.2.2 Soluzione con sezione a "Z" con sandwich ad una sola estremità.....	92
5.2.3 Soluzione a "Z" con due sandwiches, uno per ogni estremità.....	94
5.2.4 Soluzione italiana, forma a "C" con due sandwiches	95
5.2.5 Soluzione italiana chiusa, sandwich con straws inglobati	96
5.3 Descrizione delle fasi di montaggio dell'interfaccia per straws.....	98
5.3.1 Realizzazione dello strut.....	98
5.4 Lavorazione del rohacell	103
5.5 Assemblaggio della componentistica realizzata	107
5.5.1 Incollaggio del rohacell all'interno nello strut.....	108
5.5.2 Incollaggio degli straws all'interno del rohacell.....	111
5.5.3 Incollaggio delle due parti realizzate	116
5.5.4 Inserimento sull'interfaccia di end-plates ed end-plugs	118
ANALISI COMPARATA: SOLUZIONE AMERICANA, INTERFACCIA ITALIANA.....	120
6.1 Settima stazione.....	122
6.2 Posizionamento straws nella zona a ridosso della beam-pipe.....	125
6.3 Soluzione americana	126
6.3.1 Modello agli elementi finiti ed analisi dei risultati	129
6.4 Soluzione italiana	136

6.4.1 Modello agli elementi finiti ed analisi dei risultati	139
6.5 Analisi comparata dei risultati.....	144
6.6 Supporto esterno	148
6.6.1 Struttura del supporto esterno	150
6.6.2 Raccordi	153
6.6.3 Carichi e materiali.....	154
6.6.4 Descrizione del modello agli elementi finiti.....	155
6.7 Analisi dei risultati.....	157
6.7.1 Soluzione americana	157
6.7.2 Soluzione italiana.....	164
6.7.3 Analisi comparata dei risultati ottenuti.....	170
TARATURA DEL PROTOTIPO DEL SUPPORTO ESTERNO	178
7.1 Descrizione del modello	179
7.2 Vincoli e carichi.....	181
7.2.1 Gravi.....	184
7.2.2 Molle di trazione	186
7.3 Dispositivi di misura impiegati	190
7.3.1 Fibre ottiche	191
7.3.2 Comparatore laser	193
7.4 Descrizione dei modelli agli elementi finiti	195
7.4.1 Modello unidimensionale.....	196
7.4.2 Modello 3-D.....	200
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	204

PARTE PRIMA

INTRODUZIONE

In tutti gli esperimenti che militano nel campo della fisica delle alte energie, è importante avere della componentistica di basso peso specifico nella zona d'interazione delle particelle; questo permette di avere una ridotta massa attraversata con conseguente alta trasparenza alle radiazioni.

Il lavoro svolto consiste essenzialmente nella scelta dei materiali e nel calcolo strutturale, condotto al calcolatore, di un supporto di rivelatori di particelle. Nel caso preso in esame, a fianco alla necessità di avere un componente con alta trasparenza alle radiazioni, si è cercata anche una buona rigidità della struttura poiché destinata a supportare rivelatori di tracking di particelle ad alta precisione da tenere in posizione fissa onde evitare di limitare la loro sensibilità con l'introduzione di indeterminazioni sulla loro collocazione. I due aspetti considerati sono, per l'attuale stato dell'arte, difficilmente conciliabili; è risaputo, infatti, che un'elevata rigidità è tipica di strutture massive caratterizzate, come facilmente comprensibile, da una ridotta trasparenza alle radiazioni. Ai due elementi sopra citati deve aggiungersi anche la necessità di realizzare strutture amagnetiche che non interagiscano con le particelle per la creazione di campi magnetici.

Lo studio inizialmente condotto ha mirato a coordinare questi tre aspetti, si è pertanto fatta un'analisi dei materiali attualmente conosciuti al fine di individuare quelli che meglio sono conformi alle specifiche. Si sono dovuti scartare in via preliminare materiali tradizionali quali l'acciaio e gli altri metalli perché aventi una bassa trasparenza alle radiazioni, oltre al fatto che alcuni di essi sono con struttura cubica a corpo centrato e quindi magnetizzabili. La scelta di realizzare un supporto in materiale espanso, pur rispettando le due specifiche d'amagnetismo e trasparenza, crea problemi legati alla funzione strutturale richiesta dall'interfaccia. In conformità

a quest'ultima considerazione si è pensato di realizzare una struttura composita costituita da un sandwich scatolato con pelli in pre-preg unidirezionale realizzato in epossidico con rinforzo in fibra lunga di carbonio e core in rohacell. Il primo passo è stato la formulazione di varie ipotesi di sezioni alternative; tra le possibilità presentate, si è scelta quella ritenuta più valida. Questa soluzione, sviluppata dal gruppo BTeV dell'INFN, è stata presentata come alternativa al supporto progettato dal Fermilab in quanto considerata essere di maggior rigidità a parità di massa attraversata. Una volta individuato il tipo di componente meccanico ed i materiali da impiegare si è passato all'analisi con il calcolatore. Il calcolo agli elementi finiti condotto è stato orientato alla valutazione delle proprietà meccaniche del supporto, in un primo tempo con l'applicazione di sollecitazioni semplici (sforzo assiale, momento flettente e torcente), quindi con la simulazione di carichi reali legati ai sensori da applicare. In quest'occasione si è cercato di valutare quella che è la struttura più rigida ottenibile variando l'orientazione delle pelli di composito.

Come seconda analisi si è passato allo studio del supporto a cui il supporto in esame va ad ancorarsi; ciò ha permesso di avere un'idea più precisa dell'entità delle sollecitazioni del componente, per effetto delle azioni agenti sull'interfaccia. Si è eseguito in questo modo uno studio più generale delle sollecitazioni a cui questo componente è sottoposto. Nello sviluppare questa sezione si è avuta la possibilità di avere un riscontro più attendibile mediante la realizzazione ed il testing di un prototipo reale del frame, questo ha permesso di eseguire una taratura su banco del modello realizzato al calcolatore ed una verifica dello stesso. Il passo successivo è stato quello di effettuare un parallelo tra le due soluzioni, la prima sviluppata in Italia e l'altra americana, si sono eseguiti dei confronti sulla base delle differenti rigidità a parità di massa introdotta nel cammino delle particelle.

Durante il lavoro di tesi si è seguita e documentata anche la fase che porterà alla realizzazione dello stampo dell'interfaccia; in questa sede si sono valutate le varie metodologie di realizzazione e si sono scelte quelle ritenute più valide, in quanto permettono o di facilitare la realizzazione e l'assemblaggio delle singole parti oppure sono in grado di migliorare la struttura dal punto di vista dell'aumento di rigidità o della riduzione della massa.

A fianco alla parte sperimentale si è aggiunta anche una sezione compilativa in cui si presenta prima il progetto BTeV nel suo complesso, e in secondo luogo, le singole unità costituenti, al fine di dare un'idea globale di quello che è l'esperimento. Questo per giustificare le scelte fatte nella sezione sperimentale. In quest'unità si è anche spiegato per sommi capi il principio fisico di base della stazione di rilevazione, le fasi che hanno portato all'approvazione del progetto; si è inoltre descritto il sistema di acquisizione dati, ritenuto interessante in quanto è il primo nel suo genere a prevedere la possibilità di rendere le informazioni accessibili tramite rete da un qualunque server ed in qualsiasi parte del mondo.

Capitolo 1

PROGETTO BTeV

La ricerca sui costituenti fondamentali della materia e sulle forze che agiscono tra loro ha condotto, nel corso del '900, a risultati considerevoli, fino all'elaborazione di una teoria che descrive con una buona precisione il mondo delle particelle elementari. Questo teoria, chiamata Modello Standard, è stato confermata quasi completamente nel corso degli ultimi anni grazie a studi che hanno ulteriormente rafforzato i risultati ottenuti utilizzando acceleratori sempre più potenti.

La teoria divide le particelle elementari in due classi: i leptoni, soggetti solo alle interazioni elettromagnetiche, deboli e gravitazionali, e i quarks che sono sensibili anche alle interazioni forti. Le forze tra le varie particelle sono rappresentate come scambi di quanti di energia: il fotone per le forze elettromagnetiche, i bosoni Z e W per le interazioni deboli, i gluoni per le interazioni forti, infine i gravitoni, non ancora osservati, per le forze gravitazionali. Alcuni aspetti del Modello Standard e, più in generale dei modelli teorici della fisica delle particelle elementari, richiedono l'uso di notevoli potenze di calcolo pari a quella di migliaia di personal computers che lavorino in modo coordinato.

1.1 Il Progetto BTeV

Un gruppo di ricerca di fisici, esperti informatici ed ingegneri elettrici di USA, Italia, Russia e Cina, hanno da alcuni anni iniziato la costruzione del detector in un nuovo esperimento di fisica delle alte energie, chiamato BTeV. Tale dispositivo, che rappresenta il primo esempio di esperimento in linea, non solo deve essere in grado di analizzare i fenomeni di interesse, ma deve essere anche insolitamente affidabile e facile da rimodernare e mettere a punto.

La stazione di rilevazione in fase di realizzazione è un esperimento che è disegnato per sondare in modo accurato taluni aspetti del Modello Standard, calcolare alcuni dei suoi parametri

con estrema precisione e, in particolare, verificare la spiegazione data da tale teoria sulla violazione della simmetria del CP. Ci si aspetta che le misurazioni effettuate rivelino le eventuali debolezze di tale modello in merito a quest'ultimo aspetto, in modo da fornire lo spunto per una teoria più generale di quella attualmente presente. I risultati serviranno a far luce sui fenomeni associati all'origine dell'universo, in altre parole come e perché il tutto sia fatto di materia e non di antimateria.

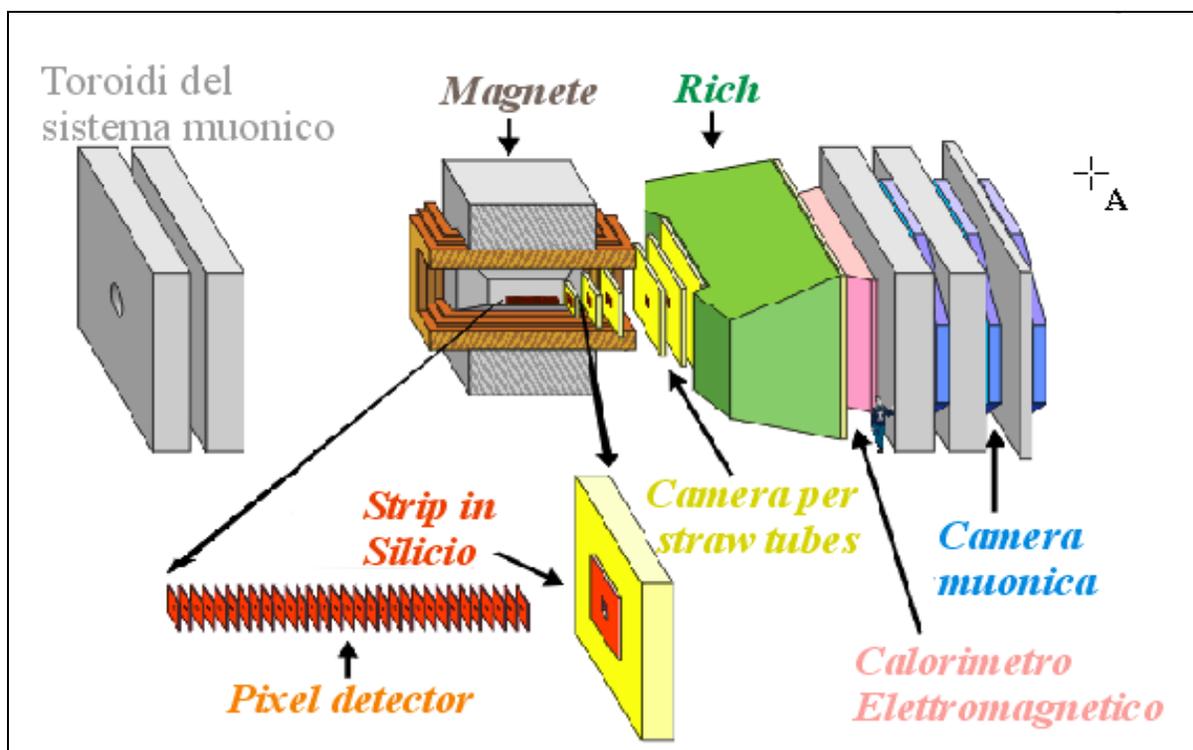


Figura 1: parti costituenti l'esperimento BTeV a Fermilab, secondo l'attuale progetto sta cercando di realizzare solo uno dei due bracci inizialmente previsti, la lunghezza di tale parte è di 12 metri.

Secondo Kaplan, “BTeV è posto bene per rispondere alle domande cruciali nella fisica di sapore pesante”. Con l'iniettore principale in operazione, il Tevatron produrrà più di 400 miliardi di adroni “B” per anno e 10 adroni “C” (contenenti charm quarks) per ogni “B”. In BTeV avvengono 15 milioni di collisioni tra particelle ad alta energia per secondo, ognuna di queste interazioni

tipicamente crea tra 10 a 100 particelle subatomiche che viaggiano attraverso il detector.

Il rivelatore BTeV è composto di:

- Un pixel detector di vertice che, oltre ad offrire informazioni offline di qualità molto alta, è usato dal trigger di Livello 1 per selezionare gli eventi di interesse. Associato al sistema di acquisizione dati permette l'accumulazione di un campione imparziale in quanto molto ricco di eventi.
- Un sistema di identificazione e per particelle che permetterà l'identificazione di mesoni K, protoni e pioni.
- Un calorimetro elettromagnetico a cristalli ad alta risoluzione che consente lo studio di precisione di eventi che contengono fotoni, pioni neutri, ed altre particelle neutre.
- Un tracciatore di eventi con microstrip di Silicio e straw tubes.

L'esperimento è progettato per esplorare le interazioni tra protone ed antiprotone nei punti posti alla luminosità di $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. La sua portata di fisica, in conformità a quanto detto sinora, supera quella degli altri esperimenti in alcune di queste importanti misurazioni.

1.2 Cenni storici

L'esperimento è concepito nel Maggio del 1997, immediatamente è ritenuto di interesse fisico elevato, sempre in quel periodo è sottoposto alla direzione del Fermilab un piano di realizzazione del progetto. Nel Dicembre dello stesso anno è stato riconosciuto come un progetto prioritario per il Laboratorio.

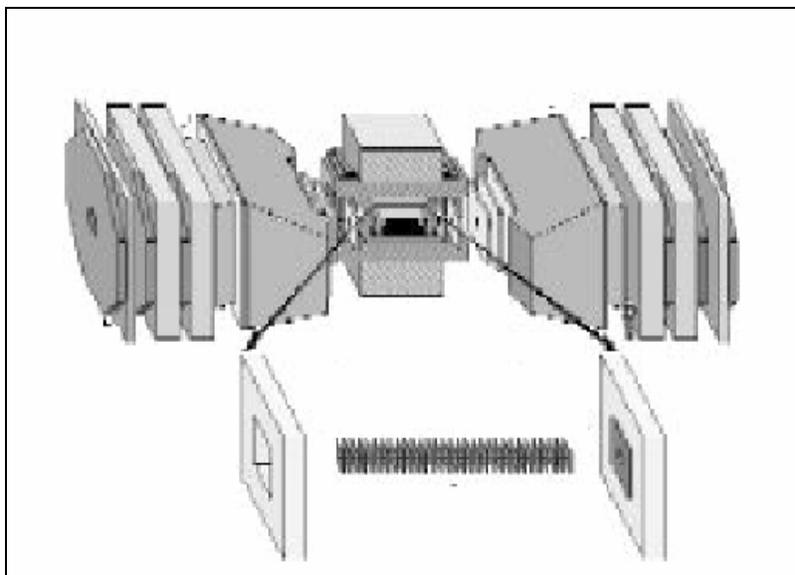


Figura 1: Progetto BTeV secondo la preliminare proposta del 1999, secondo tale schema sono previsti due bracci e non uno come l'attuale piano.

A Maggio del 1999 BTeV si sottopone ad un preliminare progetto con rapporto tecnico, questo rappresenta il primo documento che descrive in toto le funzioni e le parti della stazione di rilevazione a due bracci. Nel Maggio 2000 si presenta una proposta a Fermilab, l'Assemblea Consultiva dei fisici dell'istituto di ricerca, riunitasi in Aspen, Colorado 17 giugno 2001, ha deliberato di stanziare i fondi per realizzare tale idea, in tale occasione si è descritto come un esperimento ambizioso con “un detector elegante e difficile”, che potrebbe “essere l'esperimento definitivo che chiarifica finalmente la questione della violazione del CP”. Il mese successivo, per la sua realizzazione, sono stanziati \$130.000.000, più \$50.000.000 per i costi della regione di interazione e di beam-line (magneti e apparecchiature di altro genere).

A Marzo 2002 è stato presentato un aggiornamento di proposta che descrive uno spettrometro a singolo braccio. Il costo della realizzazione è ridotto a \$100.000.000 e si decide di ridurre parti di beam-line spostando la loro rivelazione ad altre regioni di interazione, riducendo altresì le spese supplementari.

L'Assemblea Consultiva dei fisici del Fermilab nel Maggio 2002 riapprova all'unanimità il piano di realizzazione.

Settembre/Ottobre, 2002: Fermilab conduce un esame di costo di BTeV.

La Collaborazione BTeV è un gruppo di circa 150 fisici ed ingegneri appartenenti trentacinque università ed istituti di ricerca in Bielorussia, Canada, Cina, Italia, Russia e Stati Uniti. Quest'equipe di scienziati ha fatto un eccellente lavoro nello sviluppo delle tecnologie avanzate, necessarie a rendere l'esperimento possibile, e nella realizzazione di apparecchiature per l'analisi e la rilevazione degli eventi.

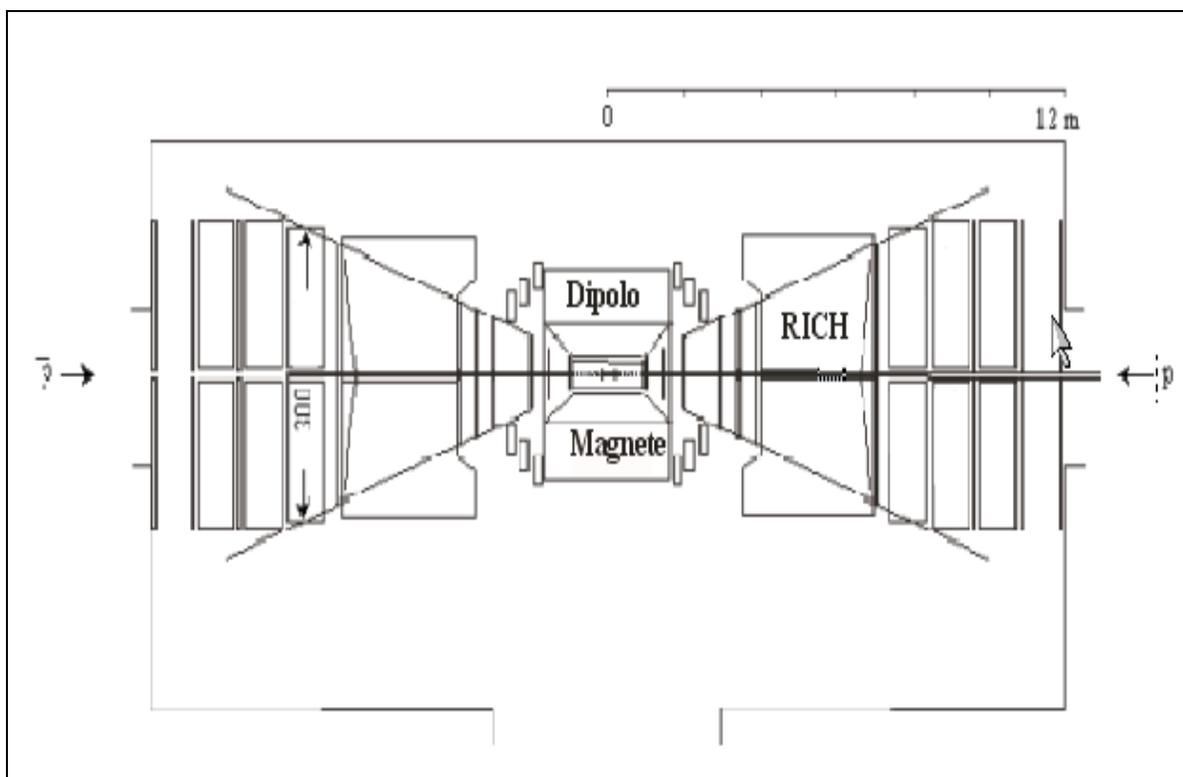


Figura 2: Pianta stazione di rilevazione secondo il progetto iniziale, ci sono due, non uno come l'attuale design, bracci che si dipartono in direzioni opposte.

L'esperimento utilizzerà il collider di protone-antiprotone di Tevatron al FermiLab, ad ovest

di Chicago, Illinois (USA), la sua costruzione dovrebbe cominciare nel 2004 e dovrebbe essere completa in tempo per prendere dati nel 2008.

1.3 Modello standard e violazione del CP in BTeV

Il Modello standard è una teoria fisica che riassume tutte le attuali conoscenze nel campo delle particelle elementari e delle forze che ne regolano le interazioni fondamentali.

Tutte le interazioni osservate in natura possono spiegarsi mediante lo studio del comportamento di un certo numero di particelle elementari. Poiché la materia è composta dalle stesse particelle, la base dello studio delle interazioni consiste nell'analisi delle leggi che regolano l'azione mutua tra tali entità; tale esame si semplifica considerando che tutte le forze conosciute si possono ridurre a quattro tipi fondamentali (elettromagnetismo, forza nucleare forte e debole e la gravità) i quali dovrebbero spiegare tutte le forze che si esercitano tra le diverse parti dell'Universo.

Sino al sec. XIX si conoscevano solo due di queste interazioni, a quel tempo era già nota la forza gravitazionale, storicamente il secondo tipo di interazione studiata fu l'interazione elettromagnetica. Il nome di quest'ultima deriva dal fatto che elettricità e magnetismo sono due diversi aspetti dello stesso fenomeno, peraltro più complesso della gravitazione, non solo per l'esistenza di due tipi di cariche elettriche, ma anche per la dipendenza di queste interazioni dalla velocità delle particelle cariche che ne sono responsabili.

Successivamente la scoperta del neutrone implicò la considerazione delle interazioni forti aventi caratteristiche assai diverse da quelle delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche. Le interazioni forti infatti sono indipendenti dalla carica elettrica e sono le forze responsabili

dell'esistenza stessa dei nuclei, che in assenza di tali forze tenderebbero a frantumarsi a causa della repulsione coulombiana tra i protoni contenuti nel limitato volume nucleare.

Il decadimento del neutrone e l'ipotesi del neutrino indussero, infine, Fermi ad introdurre un quarto tipo di interazione: le interazioni deboli, di intensità inferiore a quelle forti, ma sensibilmente superiore a quella delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche. Tali interazioni governano il decadimento di molte particelle che interagiscono fortemente e sono responsabili del regresso di certi nuclei radioattivi. L'agente responsabile delle interazioni deboli è rimasto sconosciuto fino agli inizi degli anni Ottanta; fino a che nel 1983 il fisico italiano C. Rubbia con un gruppo di ricercatori del CERN di Ginevra scoprì le particelle attraverso le quali interagiscono le interazioni deboli, individuandole nei bosoni W e Z_0 .

E' cercando di mettere in ordine le nuove scoperte, che i fisici nucleari iniziarono a costruire il Modello Standard, con l'intento di riuscire a spiegare tutte le interazioni con un'unica teoria. Sotto questo profilo però questo modello presenta dei limiti che ostacolano il raggiungimento dello scopo ultimo della fisica moderna. In primo luogo, pur avendo riunificato la forza elettromagnetica e quella nucleare debole, ci sono alcuni punti deboli nella teoria, i principali sono: non includere la forza di gravità, che è l'interazione di più debole intensità; non spiegare lo spettro delle masse delle particelle; il dover accettare la presenza di diversi parametri arbitrari; non riuscire a riunire in un solo modello l'interazione nucleare forte e la forza nucleare debole ma dover ritenere, secondo la teoria della grande unificazione, che queste due forze a temperature elevate si equivalgono.

Dalla scoperta dell'elettrone e delle altre particelle quantistiche, soprattutto negli ultimi cinquanta anni, c'è stato un grandissimo numero di esperimenti e analisi teoriche per rispondere a quesiti circa la determinazione dell'ultimo costituente della materia, il modo di classificare tali entità e il determinare le possibili interazioni tra loro esistenti.

Il Modello Standard trae le sue origini dagli studi condotti in quest'ambito, esso asserisce che la massa nell'universo è fatta di fermioni elementari che vengono a contatto attraverso campi da loro generati, in seguito a tale interazione si generano i bosoni.

Tale modello comprende le particelle fondamentali che costituiscono l'universo: i sei quark (Down, Up, Strange, Charm, Bottom, Top) ed i sei leptoni (l'elettrone, muone, tau, neutrino elettronico, neutrino muonico e tau neutrinico). Tutte queste sono accoppiate con antiparticelle con carica opposta ma stessa massa.

Uno dei più grandi interrogativi è quello che ha portato alla creazione della materia e alla sua dominanza sull'antimateria. I ricercatori, lavorando su particolari particelle, i "mesoni K", sono riusciti a misurare in modo statisticamente molto attendibile la cosiddetta violazione di CP. Questa è una legge di simmetria esistente in natura tra la carica elettrica (C) e la parità di coordinate spaziali (P). Se si prende una particella, si sostituisce con la sua antiparticella e la si guarda nello specchio, il risultato finale non cambia, è indistinguibile rispetto alla situazione di partenza; questa simmetria è chiamata in fisica "invarianza CP" (dove le iniziali stanno per "carica", "parità"). Se tale simmetria fosse valida ovunque, non ci sarebbe modo di distinguere fra materia e antimateria e l'esistenza stessa del nostro universo non si spiegherebbe. Un esperimento sui Kaoni¹, nel 1964, dimostrò che la simmetria di CP è violata nel decadimento di un certo tipo di mesoni K, che si trasformano talvolta nei loro anti-kaoni. Le indagini condotte negli ultimi tempi sui mesoni K ha permesso di aumentare enormemente la precisione ottenuta e i risultati sembrano non lasciare dubbi: la misura di diversi modi della violazione di CP è essenziale per la fisica contemporanea, poiché confermerebbe o rimetterebbe in discussione il valore del Modello Standard della fisica delle

¹ Kaoni è un altro modo per denotare i mesoni K di cui si faceva cenno in precedenza.

particelle e delle loro interazioni, e, da sola, potrebbe spiegare la preponderanza della materia sull'antimateria.

Si potrebbe affermare che la scelta per un universo fatto di materia come quello in cui viviamo è stata decisa negli istanti immediatamente successivi al Big Bang e la prova sarebbe proprio nella violazione della simmetria carica-parità (CP). Per creare l'universo che vediamo oggi deve esserci stata una prevalenza della materia sull'antimateria per una frazione di secondo dopo l'immane esplosione iniziale. Al contrario, se le quantità fossero state esattamente identiche, materia e antimateria si sarebbero annientate a vicenda, sarebbero cioè annichilite scomparendo e lasciandosi dietro una scia di energia. Stando, invece, a quanto si ricava da esperimenti sviluppati del Cern, è bastato un minimo squilibrio, una piccolissima quantità di materia sopravvissuta su tutta quella creata, per osservare oggi un universo di materia.

Diverse generazioni di esperimenti si sono succedute nei principali laboratori di fisica mondiali, ognuno dei quali ha confermato l'esistenza della violazione di CP nel sistema dei K solo nella sua versione indiretta osservata nel 1964. Nei nostri tempi non si è potuto ancora misurare alcuna violazione diretta del CP, del tipo necessario per spiegare l'assenza di antimateria nell'universo.

Una degli obiettivi principali di BTeV è misurare precisamente la violazione di CP nel sistema del quark beauty. Tale violazione porta particelle ed antiparticelle a comportarsi diversamente. La prevalenza della materia sull'antimateria, durante l'origine dell'universo, sembra richiedere un evento di grandi dimensioni, tuttavia attualmente è stata verificata solo su piccola scala, è quindi naturale cercare le risposte in tale ambito.

Capitolo 2

BTeV: DESCRIZIONE DEI SUOI COMPONENTI

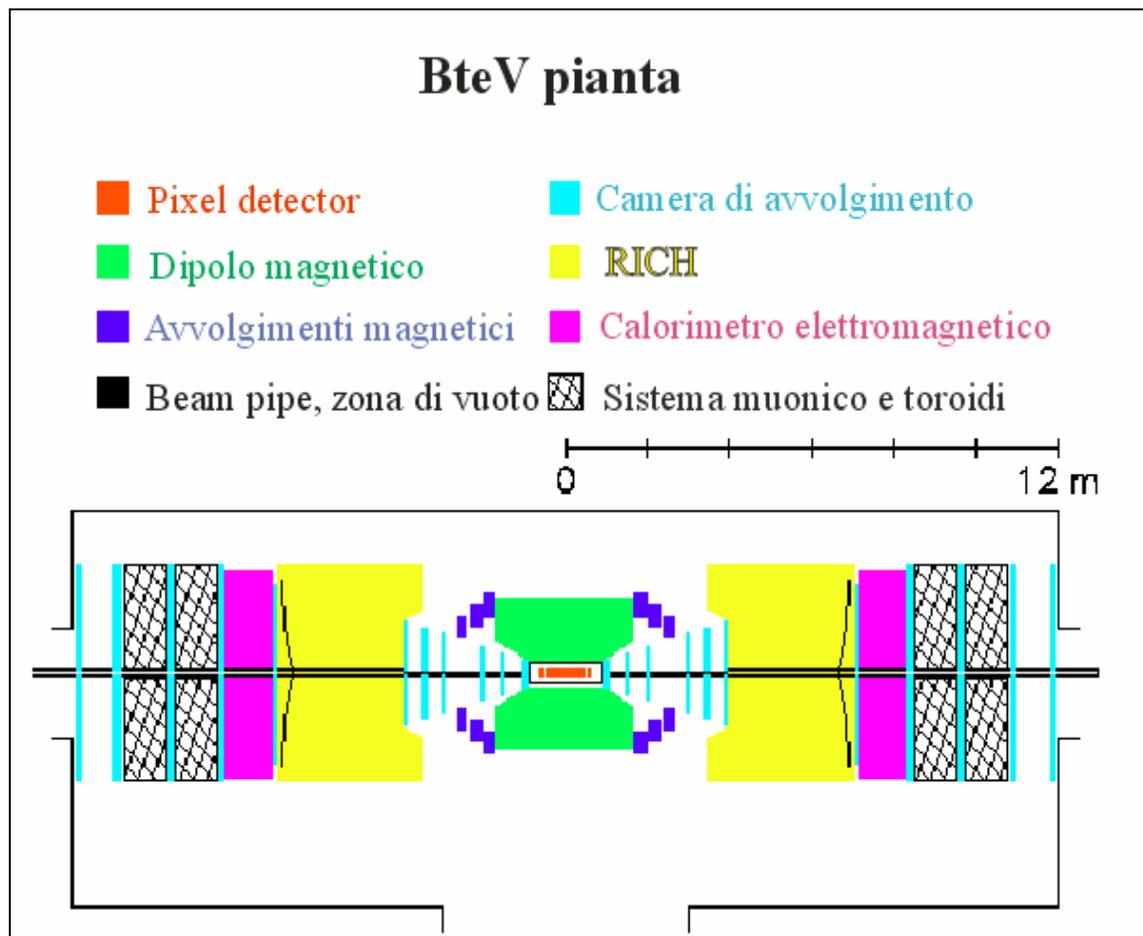


Figura 3: Schema riassuntivo parti costituenti stazione di rilevazione BTeV a due bracci.

L'esperimento BTeV va a collocarsi all'interno di un acceleratore di dimensioni maggiori, il Tevatron² in grado di produrre particelle B_s per collisione tra protoni ed antiprotoni.

² In nome tevatron deriva dall'energia di collisione tra particelle, pari a 2 TeV, per l'esperimento BTeV tali particelle vengono ulteriormente accelerate fino a 12 Tev.

2.1 Beam-pipe

La beam-pipe di BTeV è un tubo con in cui è praticato del vuoto, deve essere realizzato in materiale che minimizzi le collisioni secondarie di particelle, quelli potenzialmente impiegabili sono l'alluminio, il berillio, o i compositi.

Il sandwich può essere fatto di due pelli di alluminio³, di spessore 0,05 mm, ed un centro in espanso, a base di carbonio, spesso 2,7 mm, oppure si può realizzare questo componente con un core in rohacell e due pelli in composito a matrice epossidica e rinforzo in carbonio. La valutazione fatta ha portato a preferire un sandwich composto di due lamine di alluminio con un'anima interna in espanso, le motivazioni di questa scelta sono da ricercarsi nella bassa lunghezza di radiazione e nelle buone proprietà meccaniche della struttura, affiancate ad una buona stabilità dimensionale ed ad un basso danneggiamento in seguito all'esposizione prolungata alle radiazioni.

	Struttura Composita Core in rohacell	Struttura composita Core
Massa totale delle Pelli in alluminio (g/cm ²)	6,84	4,58
Massa del core (g/cm ²)	10,77	4,58
TOTALE (g/cm ²)	17,61	9,16

Tabella 1: Confronto tra le masse complessive delle due soluzioni per la beam-pipe.

In tabella 1 è riportato il confronto tra le masse delle due soluzioni, la prima è preferibile in termini di minor massa introdotta.

³ Per un prototipo preliminare è stata adoperata una lega di alluminio denominata 5052-H19.

2.2 Pixel detector

La determinazione delle coordinate posizionali dell'esperimento BTeV ha una risoluzione spaziale di 2 μm nelle direzioni x ed y e dell'ordine dei 100 μm nella direzione z, sia nella direzione orizzontale sia in quella verticale su una superficie di osservazione di forma circolare con diametro di 30 cm. Il punto in cui avviene la separazione, nel luogo preciso in cui avviene il decadimento con formazione di B_s , può essere determinato con un'incertezza di 138 μm . Quest'imprecisione nella determinazione della giusta posizione del punto di vertice porta ad un'indeterminazione nello stabilire il tempo di decadimento proprio delle B_s , nonostante quest'incertezza si può ritenere tale risoluzione più che sufficiente per avere un'adeguata misurazione di questo parametro temporale.

Il pixel detector di BTeV è posto in un campo elettromagnetico di 1,6 T, il magnete che lo genera è diviso in due parti in modo da poter permettere l'estrazione del rivelatore dalla regione di fascio quando le collisioni sono state identificate e la radiazione comincia a diventare instabile.

Per ogni stazione ci sono due semipiani montati ai lati opposti del supporto, si veda figura 4, la struttura è raffreddata mediante un apposito circuito refrigerante. Il rivelatore è costituito da due metà aventi una forma ad "L", entrambe sono accoppiate in modo da avere nel centro un foro che gira attorno alla beam-pipe. La posizione del buco e la sua forma sono tali da consentire ai sensori di essere posti attorno al fascio di particelle lasciando scoperto solo una zona circolare con distanza di 6 mm dalla zona di beam.

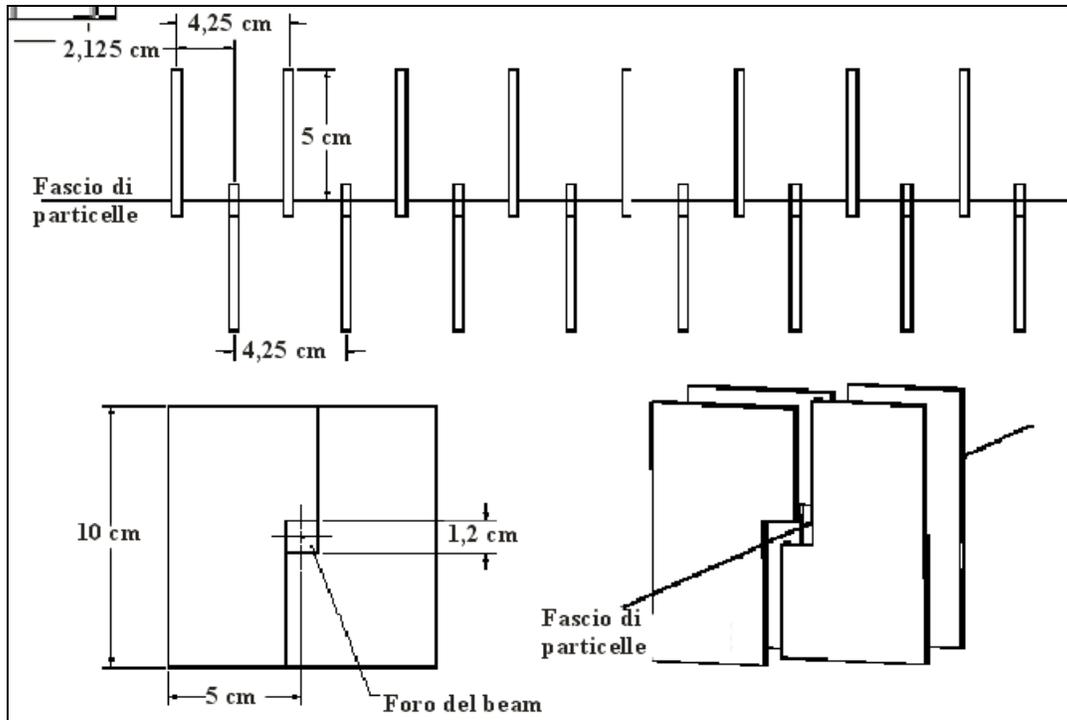


Figura 4: Progetto preliminare del pixel detector relativo ad uno degli stadi della stazione di rilevazione.

Nome della stazione Di rivelazione	BTeV Pixel Detector
Dimensione dei pixels.	50x400 mm ²
Dimensione del componente Assemblato più grande.	0,9x7,6 cm ²
Minima distanza dal Fascio di particelle.	6 mm
Numero di pixels.	23x10 ⁶
Area sensibile totale.	0,5 m ²

Tabella 2: Caratteristiche costruttive ed informazioni generali sul pixel detector.

Gli elementi del pixel sensore sono collegati a dei chips di memoria, ci sono 22 colonne con 128 elementi ognuna. La maggior parte dei chips di uscita (da 4 ad 8 per singola riga) sono usati per leggere il segnale di un singolo sensore, collegato ad un modulo assemblato mediante un circuito flessibile.

	Spessore, per Piano μm (X)	Lunghezza di Radiazione mm (X_0)	Zona di copertura	X/ X_0 Per piano (%)
Sensori	250	93,6	1,46	0,39
Chips di uscita	200	93,6	1,47	0,31
Giunzioni tra le parti	20	10	0,02	0,004
HDI e suoi Componenti	-	-	-	0,19
Adesivi	-	-	-	0,02
Substrato di supporto ed Impianto refrigerante	675	-	-	0,17
Schermatura di alluminio	150	89,0	1,0	0,16
TOTALE	-	-	-	1,25

Tabella 3: Stima degli spessori adoperati nel BTeV pixel detector, X_0 è la lunghezza di radiazione del corrispondente materiale. Il termine "copertura" è riferito alla frazione ricoperta di area sensibile per ogni singolo materiale. Si può notare che la frazione più grande di perdita di radiazione è da attribuirsi alla sensoristica ed all'elettronica.

Ci sono circa 23 milioni di pixels nel totale assemblato con un'area di ricopertura di $0,5 \text{ m}^2$.

Per minimizzare il materiale tra il fascio e gli elementi attivi del pixel, il rivelatore è tenuto sotto vuoto con un sottile strato di protezione tra loro è la radiazione. Anche i rivelatori sono sottili in modo da ridurre il materiale attraversato dalle particelle nello spazio che precede la prima interazione. La tabella 2 riassume le specifiche principali del pixel detector.

La tabella 3 dà la media del totale del materiale attraversato e valuta la perdita di radiazione (X_0), in percentuale, per l'intera massa attraversata da una particella che incide in modo perpendicolare sulla superficie del sensore. Il valore totale è 1,25% per singolo piano e 2,5% a stazione.

La rivelazione dei vertici da parte del trigger dipende dalle prime tre stazioni attraversate dalle cariche, un sottosistema che corrisponde a circa 7,5% di perdita totale di lunghezza di radiazione.

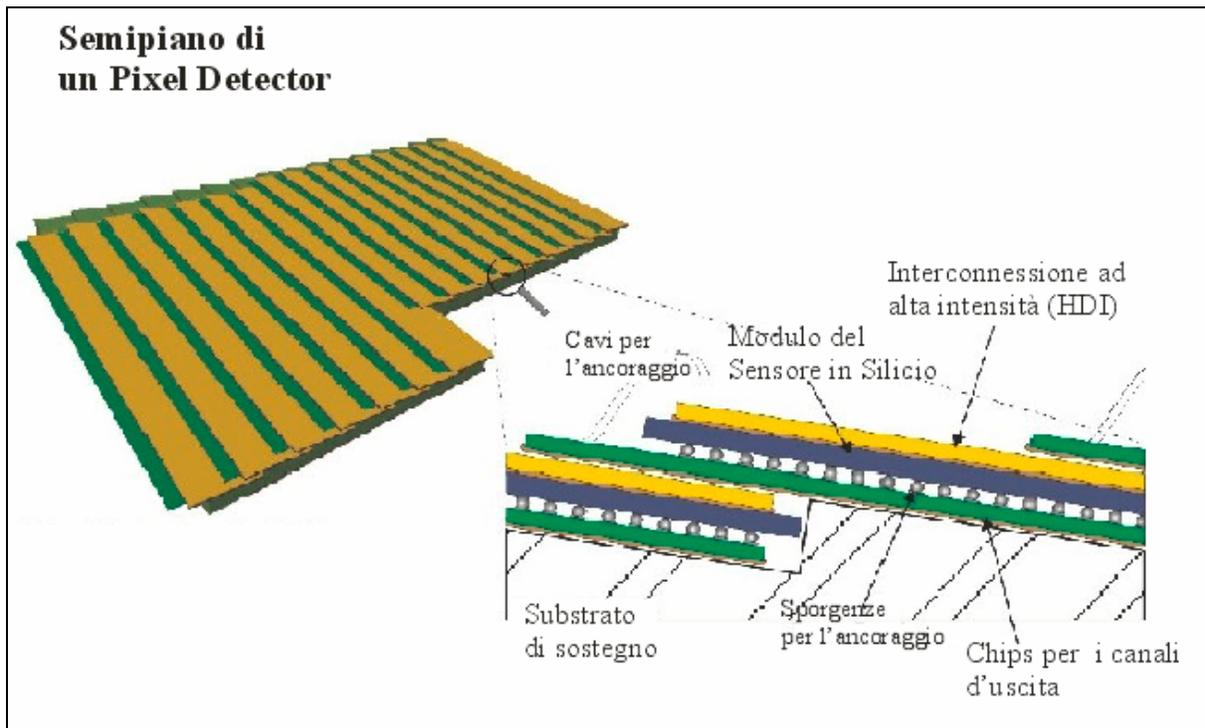


Figura 5: Sezione con componenti del pixel detector di BTeV relativi ad un semipiano di rilevazione.

Essendo il pixel detector chiuso all'interno del fascio, è esposto ad un gran quantitativo di radiazioni, il danneggiamento della maggior parte di quest'unità della stazione di rilevazione è da attribuirsi principalmente al flusso di carica, circa 10^7 particelle al cm^2 al secondo, nella zona di maggior interazione del fascio. Per ridurre il danno da radiazione in BTeV è usato del Silicio a bassa resistenza con drogaggio n^+n^-p .

Il detector è provvisto di dieci anelli di guardia per permettere l'applicazione di 600 V, tensione questa necessaria per permettere una buona rivelazione di cariche anche dopo una decina di anni di continuato funzionamento. Il sistema opera a -5°C per minimizzare fenomeni di trasformazione strutturale innescati dall'energia fornita dalle cariche.

I chips usati hanno uno spessore di 25 μm , per la rilevazione sono adoperati dei comparatori, il loro tempo di risposta⁴ è di 0,125 ns per pixel. I dati raccolti sono raccolti in variabili numeriche di 140 Mbit/s, la banda passante del detector è 2000 Mbit/s, il sistema progettato consentirebbe di acquisire il triplo dei dati rispetto alla normale portata del fascio.

Il supporto di base del raffreddamento è realizzato in materiale a base di carbonio, in particolare il progetto per i tubi di raffreddamento prevede una struttura in carbonio amorfo; in alternativa si può realizzare il basamento in grafite pirolitica o in foam. Il sistema da vuoto funziona con un pannello refrigerante operante alle temperature dell'azoto liquido e con un efficiente sistema di aspirazione dei fluidi presenti.

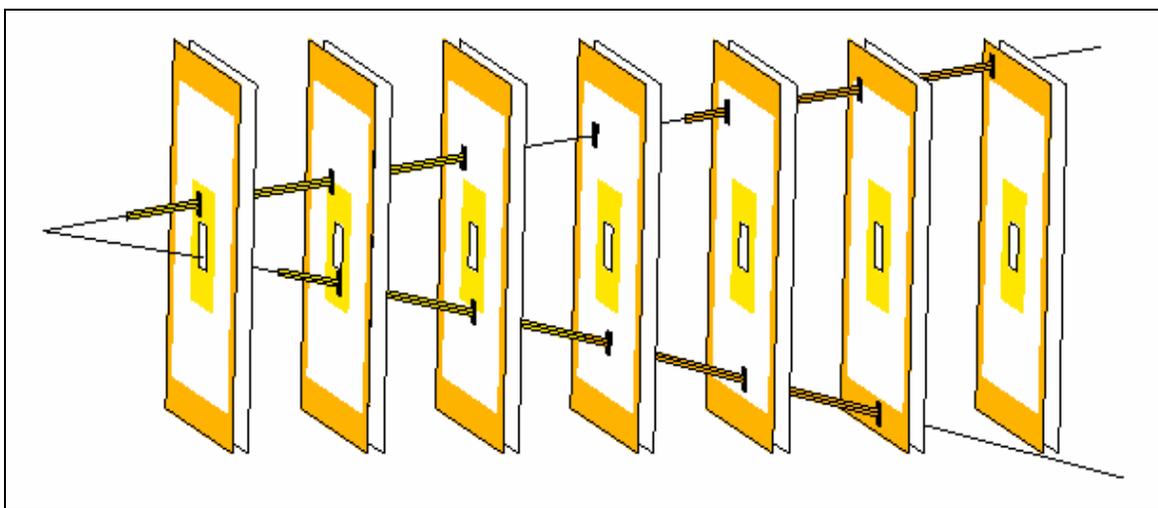


Figura 6: Coppie di piani dei pixels con indicati i bordi interni ed esterni, all'interno di tale regione si collocano i sensori di posizione.

Il pixel detector è impiegato per identificare gli eventi nei quali è possibile che, in seguito al decadimento delle particelle coinvolte, si sviluppino quarks di interesse per l'esperimento. La scelta

⁴ Definiamo tempo di risposta l'intervallo temporale necessario al segnale rilevato dal pixel per arrivare alla base della colonna.

⁵ Questo espanso è conosciuto con il nome di "Pocofoam" ed è prodotta dal gruppo Poco Graphite, Inc., Decatur, Texas.

delle interazioni interessanti, e la conseguente eliminazione di quelle non in grado di dare le particelle cercate, è eseguita da un algoritmo matematico di selezione basato sulla misurazione del corto tempo di vita dei quark generatisi e dalla misurazione dei parametri di urto, essendo questi ultimi maggiori rispetto a quelli delle altre collisioni. Il modello di accettazione dati è arricchito tenendo presente che ci sono due tipi di decadimento di interesse, entrambi in grado di dare un allargamento dei segnali rilevati.

Il sistema trigger è in grado di determinare il punto di interazione tra protone ed antiprotone per ogni singolo evento che avviene nella zona di interazione in una regione di circa 30 cm^2 . Usando lo stesso rivelatore per determinare il primo vertice è il relativo cammino della particella, è possibile ricostruire la posizione assoluta all'interno del fascio. Un ruolo importante per avere un'alta efficienza è svolto dalla particolare forma del detector. Grazie ai particolari algoritmi di analisi messi a punto appositamente per BTeV è possibile avere un'eliminazione del 99% degli eventi non desiderati ed un'efficienza di rilevazione superiore al 50% per quei decadimenti che generano B_s .

2.4 BTeV Ring Imaging Cerenkov Counter (RICH)

Il RICH di Cerenkov, in altre parole un contatore anulare basato sull'effetto Cerenkov, è usato per distinguere le trasformazioni delle quantità di materia, è un dispositivo per la rilevazione di particelle a distorsione $\pi/k/p$. L'angolo di apertura del cono di radiazione Cerenkov misura la velocità (v) della particella che lo attraversa, questo può essere usato per determinare la sua massa (m) misurando in modo indipendente il momento della stessa ($p = mv$).

Il detector del RICH ha usato inizialmente un mezzo di trasmissione gassoso (C_4F_{10}) nel

quale le particelle producono luce, riflessa da uno specchio sferico, ed, in seguito, raccolta da un apparato di diodi fotografici ibridi (Hybrid Photo Diodes o HPDIs). Alla specie gassosa si è sostituito del C_5F_{12} liquido, è stato verificato che si riesce ad ottenere una migliore rilevazione anche per particelle aventi un momento di piccola entità.

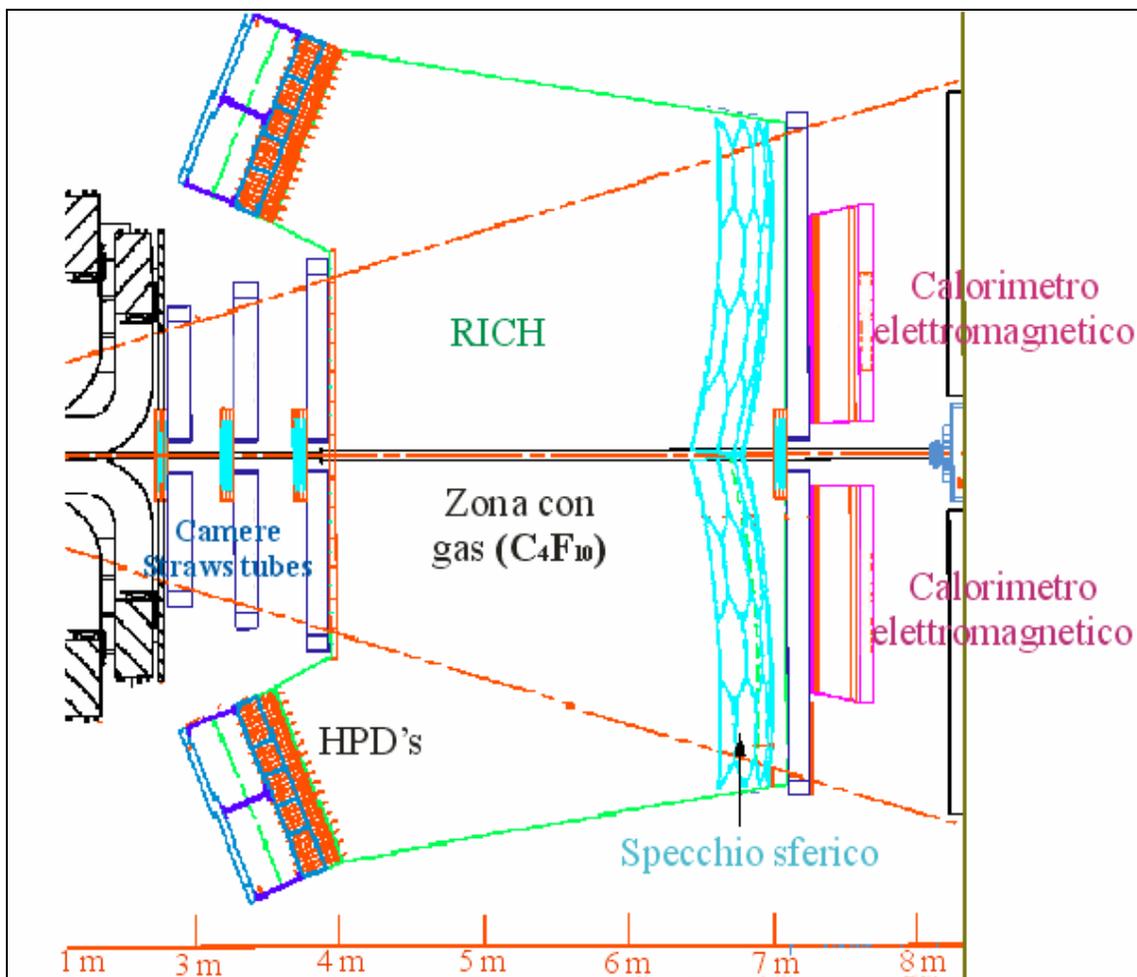


Figura 7: Pianta del contatore anulare di immagini di Cerenkov (RICH).

Diodi fotografici ibridi a grande area furono sviluppati da DEP (Del Electronic Product) in collaborazione col gruppo di LHC-b. Un fotone Cerenkov, venendo a contatto con il fotocatodo

posto sulla superficie interna della finestra di quarzo, è in grado di trasformarsi in un elettrone. L'elettrone è quindi accelerato applicando un potenziale nel tratto che precede l'impatto con il diodo di Silicio. Un campo elettrico con forma particolare focalizza gli elettroni sopra il diodo, un rumore di fondo di natura elettronica, avente bassa intensità, si associa alla rilevazione della carica. Ogni diodo è diviso in piccoli pixels, ognuno dei quali è letto in modo individuale tramite chips applicati nella parte esterna del tubo, in questo modo è possibile riuscire a determinare le coordinate spaziali del fotone.

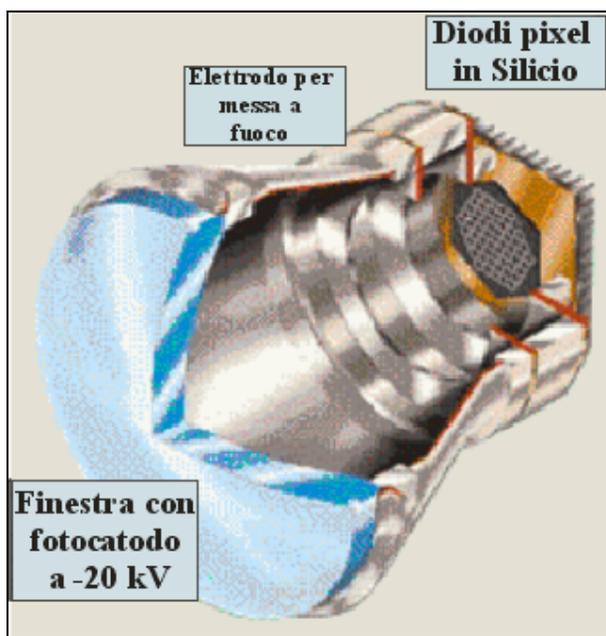


Figura 8: Rappresentazione grafica del RICH di BTeV.

Il primo HPDIs di quel tipo realizzato da DEP ha 61 pixels per ogni tubo, attualmente, invece, si sta sviluppando un diodo con 163 pixels.

In seguito alla eliminazione dal progetto del secondo braccio si è ridotto il quantitativo di dati acquisibili di un fattore due, questo ha ripercussioni sull'analisi statistica. In ogni modo, la

memoria dell'intero sistema di trigger permette lo studio di algoritmi più complicati e così recupera approssimativamente il 15% della perdita di risultati. In somma, la proposta nuova è accettabile a patto di usare il RICH a grande angolo per identificare i leptoni.

Sostituendo l'aerogel con C_5F_{12} in grado di produrre radiazioni si ha il vantaggio aggiuntivo di Cherenkov produrre luce a grande angolo, lontano dalle radiazioni dei fotoniche del gas, si permette l'impiego di un detector indipendente che adopera i tubi di un fotomoltiplicatore standard.

2.5 Calorimetro elettromagnetico ($PbWO_4$)

Il calorimetro elettromagnetico usa cristalli scintillanti di tungstato di piombo, conosciuti per la capacità di avere un rendimento di rilevazione dell'energia incidente ed una risoluzione spaziale superiore rispetto a quella degli altri materiali. Tali cristalli sono inoltre conosciuti per avere una ridotta densità ed un'altrettanto corta lunghezza di radiazione, per queste caratteristiche essi sono stati scelti come sensoristica di base nella stazione di rilevazione BTeV. A differenza di esperimenti affini, che adoperano gli stessi rilevatori, il Tevatron non è posto in un campo magnetico molto intenso, è quindi possibile accoppiare questa sensoristica con un sistema di trasmissione operante con dei tubi fotomoltiplicatori a finestre di quarzo piuttosto che con fotodiodi o fototriodi a cascata o sotto vuoto⁵. Questa scelta dovrebbe portare ad avere una riduzione del rumore di fondo ed un miglioramento del potere risolutivo dello strumento apprezzabile soprattutto alle basse energie, entrambe le considerazioni trovano riscontro empirico nei test Monte Carlo praticati in fase di messa a punto di tali apparecchiature.

⁵ L'impiego di diodi o triodi, ottenuti dall'accoppiamento di, rispettivamente, due e tre semiconduttori drogati opportunamente, è l'unica soluzione, almeno per l'attuale stato dell'arte, da usarsi alla presenza di campo magnetico molto intenso. La creazione di un gap di portatori di carica nella zona posta a ridosso della superficie di contatto tra le superfici, risulta essere abbastanza stabile e non risente della presenza di eventuali campi magnetici esterni. Non si può dire lo stesso per il fotomoltiplicatore.

I cristalli di PbWO_4 sono attualmente prodotti in Russia presso Bogoroditsk al centro BTCP⁶ ed in Cina, all'SIC⁷ di Shanghai, analoghi sensori sono usati nell'acceleratore russo U70 di Protvino costruito nel 2001. Secondo misurazioni sulla sensibilità eseguite su tale componente si ha produzione di 5000 fotoelettroni ogni GeV di radiazione incidente per cristallo, costituito da 1000 unità di PbWO_4 . Quando un elettrone, avente un'energia variabile entro l'intervallo $1\div 45$ GeV, impatta contro una superficie di 4×4 mm² di cristallo si riesce ad avere un rendimento di rilevazione massima del 76%, tale valore è tuttavia minore se aumenta l'angolo di incidenza tra la normale alla superficie e la direzione di incidenza del fascio.

La risoluzione energetica di questo tipo di rivelatore è dell'1% per energie inferiori ai 10 GeV. Le dimensioni e dei sensori usati per il Calorimetro Elettromagnetico sono:

- Spessore $27,2\times 27,2$ mm² nella parte anteriore, 28×28 mm² nella parte posteriore;
- Lunghezza 22 cm (25% della lunghezza di radiazione X_0).

Il campo di radiazione prodotto dal PbWO_4 è fortemente influenzato dalla temperatura, per evitare oscillazioni di segnale dovute a questo effetto, i cristalli sono posti in un box trasparente alle radiazioni ed isolato termicamente. All'interno di questa camera stagna è fatta circolare una miscela al 70% di Argon e 30% di Isobutano. Il controllo della temperatura è eseguito grazie all'ausilio di un criotermostato con una tolleranza di errore dello $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Per effettuare un controllo sulla stabilità termica si adoperano 24 distinti sensori di temperatura posti sia nella parte anteriore sia posteriore dei vari cristalli.

⁶ BTCP sta per Bogorodits technochemical plant.

⁷ SIC sta per Shanghai Institute of Ceramics.

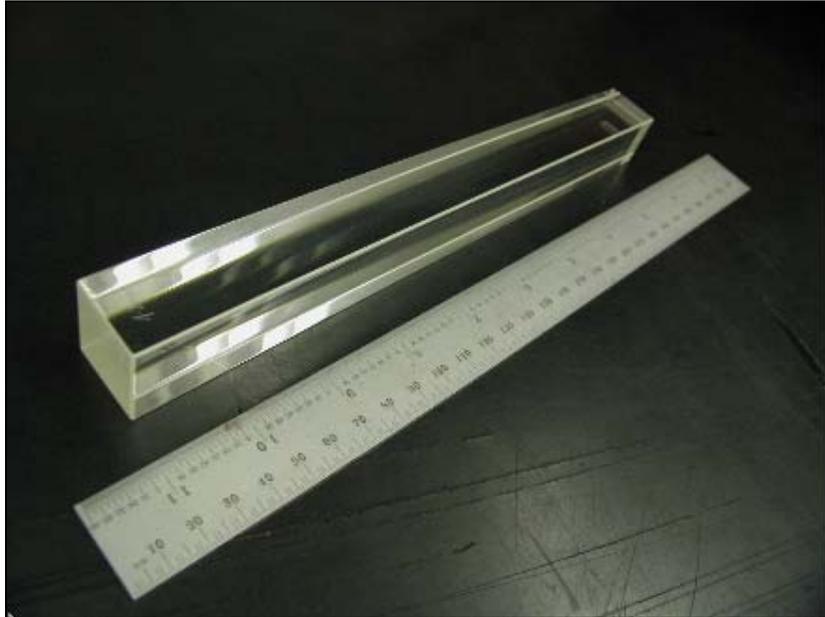


Figura 9: Cristallo di PbWO_4 costituente il calorimetro elettromagnetico, la lunghezza è di 22 cm.

Il sistema di acquisizione dati, la cosiddetta elettronica, è costituito, come detto, da dei fototubi, accoppiati otticamente con i cristalli e gestiti da transistori ad alto voltaggio. Il segnale rilevato, tempo di risposta 150 ns, è inviato ad un pannello posto nella stanza di controllo per l'amplificazione e una prima discriminazione. Per evitare la creazione di non graditi effetti loops con il box della camera criotemostatata, bisogna evitare che ci siano contatti tra queste parti.

Il sistema di acquisizione dati è controllato da PC, la sua struttura prevede:

- Un dispositivo per la lettura dei cristalli⁸;
- Dei moduli per la misurazione delle regolazioni dei segnali nelle camere da vuoto⁹;
- Trigger logici per il controllo e la gestione della raccolta dati.

⁸ Questo dispositivo è denotato CAMAC.

⁹ La loro dizione corretta è moduli TDC.

	Valori
Densità (ton/m ³)	8,28
Lunghezza di Radiazione (cm)	0,89
Massa attraversata (cm)	22,4
Indice di rifrazione	2,30
Coefficiente di Dilatazione termica (%/°C)	-2

Tabella 4: Caratteristiche del PbWO₄, valori di letteratura.

Tale sistema usa una piattaforma Linux, il software, chiamato HISTOSCOPE, è usato sia come supporto per il controllo dell'analisi, sia per uno studio on-line dei dati. Per avere degli esami più dettagliati e per la realizzazione di un archivio si adoperano dei processori di appoggio esterni alla linea di controllo.

La revisione dei dati include: check-up termico, esame del voltaggio e monitoraggio dell'elettronica di alimentazione del calorimetro, verifica del corretto posizionamento della struttura, controllo dei fototubi per la rilevazione del segnale.

Con quest'apparato è possibile la ricostruzione di γ e π . I prototipo di questo calorimetro è stato sviluppato a Bogoroditsk, in Russia, ed a Shanghai, in Cina; le misure sono prese facendo riferimento al campione posto nell'acceleratore di Protvino, in Russia, in grado di generare un fascio energetico di intensità oscillante tra 1 e 45 GeV.

	Valori
Superficie della sezione attraversata Nella parte anteriore (mm ²)	28,0x28,0
Superficie della sezione attraversata Nella parte posteriore (mm ²)	27,2x27,2
Spessore (cm)	22
Lunghezza di radiazione (cm)	25
Superficie del foro Del fascio di particelle (cm ²)	9,88x9,88
Angolo di ricezione medio (mrad)	±200

Tabella 5: Dati tecnici calorimetro elettromagnetico di BTeV.

2.6 Sistema Muonico

Il sistema muonico ha un ruolo importante negli obiettivi del progetto BTeV, le sue funzioni sono principalmente due: la prima è l'individuazione, come fa anche il trigger di vertice, di quegli eventi contenenti leptoni μ ¹⁰.

Caratteristiche del sistema muonico sono:

- Robustezza, realizzazione di una struttura molto rigida per avere un corretto posizionamento dei suoi costituenti;
- Grande quantitativo di carica accumulabile, la capacità deve essere dell'ordine di alcuni kHz/cm² per avere una buona analisi dei dati;
- Creazione di un campo magnetico mediante la presenza di due campi toroidali di intensità di 1,5 T aventi uno spessore di 1 m;
- Basso tempo morto: tempo di ricostruzione di un evento 50÷60 ns;
- Alta risoluzione spaziale, generalmente 2, 3 mm di errore nella ricostruzione del tracking delle particelle;

¹⁰ Il termine leptone μ è un altro modo per indicare i muoni.

- Ridotto ingombro longitudinale, necessità dettata da limiti costruttivi dell'intero esperimento;
- Bassa suscettibilità ai neutroni;
- Uniformità dello spazio occupato e riduzione della massa introdotta specie se concentrata.



Figura 10: Prototipo di una stazione del sistema muonico parzialmente montato, si notino in basso i tre ottanti con le diverse orientazioni dei tre assi a 0° ; $22,5^\circ$ e $-22,5^\circ$ rispetto all'orizzontale.

Il corpo base del complesso del detector è un piano costituito da 32 tubi proporzionali in acciaio inossidabile con diametro di 9,52 mm disposti in un doppio strato con uno sfasamento di mezzo tubo tra loro e tenuti assieme in due o tre punti da dei nastri di alluminio. Questa struttura realizza un blocco con un'alta rigidità in grado di autosostenersi, i tubi proporzionali, di spessore 0,25 mm, sono adoperati nel corpo del detector perché robusti ed aventi la necessaria capacità di accumulare carica, oltre ad un basso grado di danneggiamento con esposizione continuata alle

radiazioni ed ad un bassa probabilità di errore.

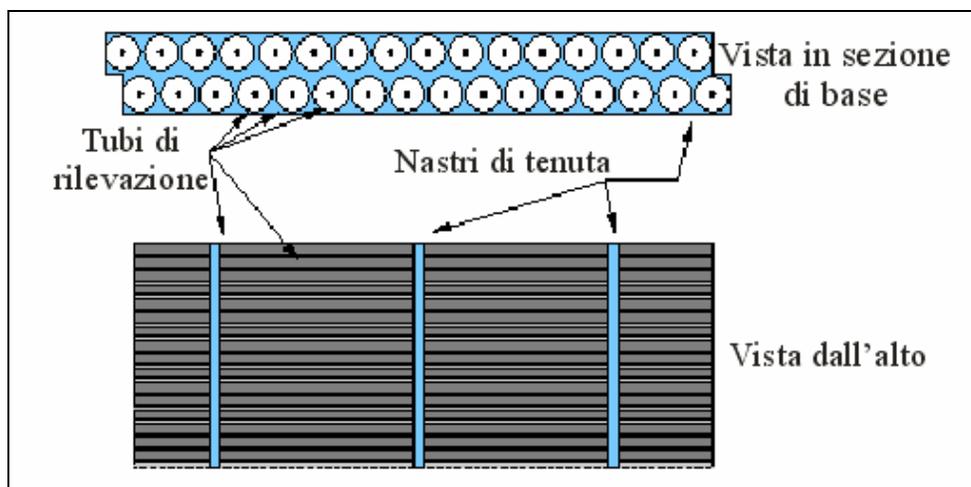


Figura 11: Pacchetto tubi del sistema muonico, sezione di base e prospettiva dall'alto.

Questi tubi sono riempiti da un miscela di gas (88% Argon, 1% CF_4 e 2% di CO_2), caratterizzato da un bassa viscosità, la velocità di flusso è di $9 \text{ cm}/\mu\text{s}$, in questo modo il tempo massimo di rilevazione del segnale si è stimato essere dell'ordine di 60 ns.

Per minimizzare lo spazio occupato, ogni stazione è costituita da otto strati sovrapposti e forma un ottagono, ogni ottante¹¹ è un'unità singola ed è sospesa al supporto esterno. Ognuno di questi settori ha tre ordini di tubi disposti secondo tre diverse orientazioni, tra un ordine ed un altro è posto un sottile foglio di alluminio in modo da riuscire parzialmente a filtrare le radiazioni. I tre assi di cui si faceva cenno in precedenza sono disposti a 0° , $22,5^\circ$, $-22,5^\circ$ rispetto al piano orizzontale, il terzo asse da ridondanza nella rilevazione della posizione, in studi particolari¹² questa coordinata aggiuntiva è in grado di dare migliori risultati. La scelta dell'angolo di orientazione degli assi a $\pm 22,5^\circ$ è stata fatta sulla base di tests effettuati su prototipi condotti soprattutto con il metodo

¹¹ E' definito ottante una sezione avente la forma di un triangolo isoscele con vertice nel centro dell'ottagono e per base un suo lato, ogni stazione ha otto ottanti.

¹² Rientrano nella tipologia di studi che necessitano di un asse ridondante le analisi di efficienza.

Monte Carlo. L'averne una forma ottagonale permette al rivelatore di rimanere molto vicino alla beam-pipe ed avere una distribuzione di massa uniforme all'interno dell'esperimento.

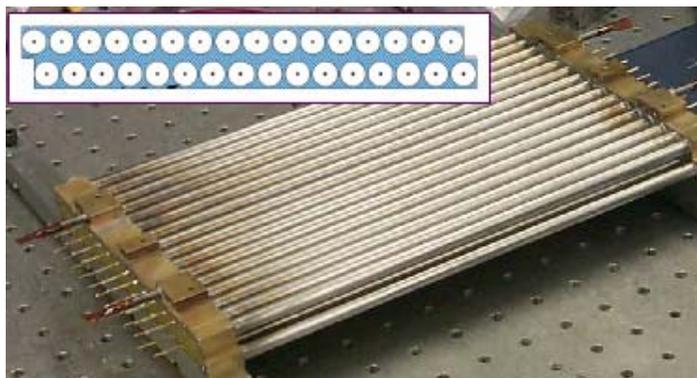


Figura 12: Tubi proporzionali pronti per il montaggio nel sistema muonico, in alto la loro disposizione su un piano trasversale alle basi.

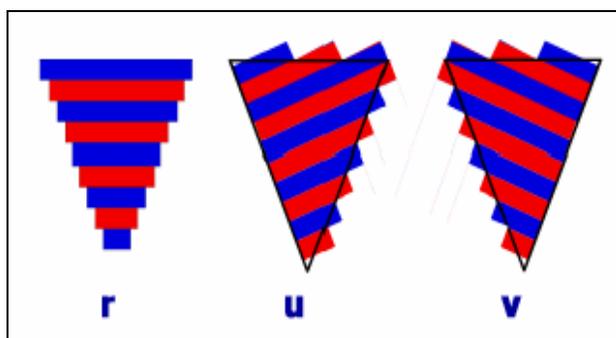


Figura 13: Disposizione dei piani di tubi in ogni ottante, gli angoli sono di $\pm 22,5^\circ$ rispetto all'orizzontale.

Ogni settore ha 15 piani per vista, 32 canali per piano, 1440 per ogni ottante, in ogni stazione di rilevazione ha 11520 piani e in ogni braccio ci sono 34560 piani. Ogni stazione ha un peso tra le 1,5 e le 2 tonnellate. Il tubo più lungo ha una lunghezza di 19,68 metri con un diametro di $20\div 50 \mu\text{m}$, verifiche effettuate hanno dimostrato che non sono necessari supporti meccanici per tenerlo in posizione all'interno dell'ottante.

Spessore tot. per singola stazione	Numero tot. di canali per braccio	Numero di ottanti Per stazione	Numero di canali Per singolo ottante (da 3 piani)	Risoluzione spaziale
200 mm	35000	8	1440	1,5 mm
Distanza tra i tubi	Diametro dei tubi per La rivelazione	Dimensione dei Singoli piani	Apertura angolare Per singolo ottante	Intensità del campo Magnetico toroidale
5 mm	10 mm	20 m ²	0,2 rad	1,5 T

Tabella 6: Tabella riassuntiva caratteristiche sistema muonico.

Mediante le analisi Monte Carlo si è anche cercato di valutare il margine di errore accettabile dal trigger, per ottenere una qualità accettabile si deve avere una percentuale di sbaglio non superiore al 10%.

Il segnale raccolto è elaborato ed amplificato da un apposito sistema ed inoltre è convertito in digitale per una successiva analisi o un suo immagazzinamento in apposite banche dati di cui si fa cenno in seguito.

2.6 Dispositivi e software per la rielaborazione dei dati raccolti.

Per questo stazione di rilevazione sono state proposte delle metodologie e delle apparecchiature costituite principalmente da sistemi di computers in grado di fornire in tempo reale le seguenti performances:

- Raggiungere prestazioni di calcolo molto alte attraverso l'uso di architetture hardware impiegate in parallelo;
- Raggiungere e mantenere l'integrità dei dati attraverso l'esame gerarchico ed il loro controllo;
- Facilità di messa a punto;

- Possibilità di essere migliorabile e riconfigurabile dinamicamente.

Per ricostruire 15 milioni di interazioni di particelle al secondo e decidere quali eventi sono da trattenere per l'ulteriore analisi, è richiesto il parallelo di un massiccio, quanto eterogeneo, quantitativo di risorse di calcolo. Il software, da impiegare per questo tipo di sistema incorporato operante in tempo reale, ha creato problemi nel campo dell'informatica e della pianificazione dei dispositivi la cui soluzione può avere applicazione anche in altri settori. Le caratteristiche di tali calcolatori sono di far lavorare l'hardware di più computers in contemporaneo e di avere un'elevata velocità nell'elaborazione dei dati, tal esigenza nasce perché BTeV produce un numero molto grande di dati tra loro interconnessi da elaborare in tempi brevi.

L'architettura del sistema è composta di migliaia di microprocessori come il DSPs¹³ o l'FPGAs¹⁴ connessi da reti ad alta velocità.

Altri aspetti importanti sono la possibilità di raccogliere ed immagazzinare dati per lunghi periodi e rendere tali informazioni estremamente disponibili ed accessibili, anche a distanza, questo perché eventi, se pur rari, possono essere di notevole interesse.

La realizzazione di una struttura di tale entità richiede lo sviluppo di un apparato di acquisizione dati con sistemi incorporati, si è sviluppato circa il 5% di tale complesso nel 2002, si conta di portarlo a termine tra il 2005 ed il 2006, tuttavia saranno possibili ulteriori ottimizzazioni quando BTeV sarà operativo.

Per la realizzazione di tali apparati, è necessaria la collaborazione interdisciplinare tra sperimentatori ed esperti di computers venuti da università ed istituti di ricerca facenti parte della collaborazione BTeV.

Molte domande di sistemi incorporati operanti in tempo reale richiedono prestazioni

¹³ DSPs sta per Digital Signal Processors, sono dei Microprocessori a Segnali Digitali.

¹⁴ FPGAs sta per Field Programmable Gate Arrays, è un Campo Programmabile per l'accumulo dei dati.

computazionali e disponibilità alte. La fisica delle alte energie è solamente una delle tante discipline che devono raccogliere e analizzare quantitativi enormi di dati in tempo breve e continuare ad operare anche se si verificano condizioni anomale o errori¹⁵. Dal momento che si prevedono margini di sviluppo notevole nei prossimi anni nel campo dei sistemi integrati, la ricerca svolta deve essere estremamente disponibile, facilmente aggiornabile e correggibile per tutta la durata dell'esperimento in modo da potersi avvalere degli ultimi ritrovati nel campo dell'informatica.

BTeV genererà un ammontare enorme di eventi, approssimativamente 1500 Mbytes/s; i fattori, che contribuiscono a generare questa percentuale di dati insolitamente grande, sono l'alto numero di interazioni (15 milioni di collisioni/s), il grande quantitativo di particelle prodotte ed i tanti sensori elettronici impiegati (30 milioni di canali nel corrente progetto) nel detector.

La luminosità del BTeV è, come detto in precedenza, di $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mentre il quantitativo di eventi che generano particelle B_s è di 4×10^{11} per anno, solo 1/500 del numero totale. Il trigger di livello 1 opera con una massima velocità di attraversamento di fascio di 7,6 MHz ed è posto nella parte della stazione di rilevazione più interessata dal sistema di rivelazione. In queste condizioni il dispositivo di vertice deve far fronte ad un tempo medio intercorrente tra due interazioni successive di 132 ns.

Il sistema di trigger ha tre livelli distinti, Livello 1 (L1), Livello 2 (L2), e Livello 3 (L3) usati in parallelo per rendere contemporanee le procedure di calcolo su ogni livello.

Il livello L1 raccoglie i dati dei trigger di vertice, esso funge da interruttore in grado di selezionare le informazioni da analizzare in L2 e successivamente in L3, in questo modo sono selezionati gli eventi di interesse da archiviare. I dati scelti, disponibili per una successiva analisi, occupano circa 200 Mbytes/s contro i 1500 Mbytes/s prodotti. Il trigger di vertice L1 adopera un

¹⁵ Altri esempi di questo genere sono i sistemi per il controllo del traffico, dispositivi usati in campo economico o militare.

algoritmo di riconoscimento che usa approssimativamente 500 Campi Programmabili¹⁶, per ricercare le particelle che si sono generate nell'interazione¹⁷, è necessario prevedere lo stoccaggio di tali informazioni per il tempo occorrente a L1 per eliminare quelli non interessanti¹⁸. L'obiettivo del primo livello è scartare il 99% delle interazioni che avvengono nel detector; gli eventi utili saranno inviati al trigger di L2 che compie un'analisi dei dati con un criterio di selezione più severo, L3 la migliora ulteriormente completando lo studio particolareggiato.

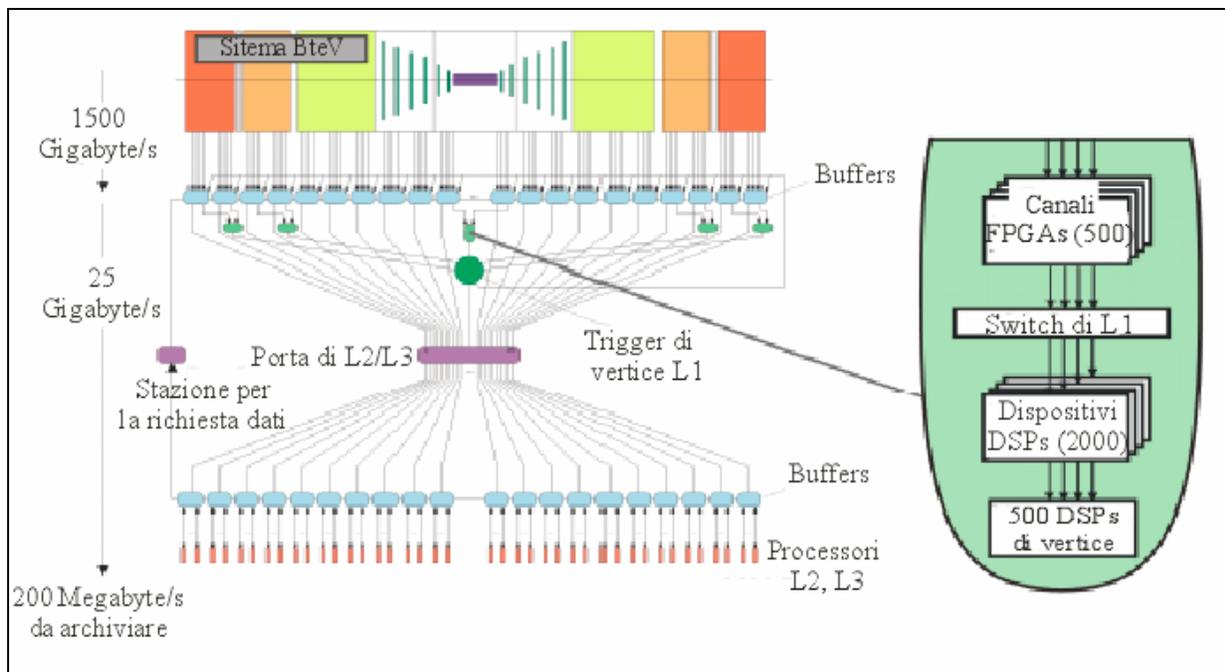


Figura 14: Schema riassuntivo del sistema completo di acquisizione dati, a sinistra nel dettaglio la struttura del trigger di vertice L1.

La sfida di BTeV è di selezionare solo le interazioni di interesse, ovvero quelle che coinvolgono le B_s , per scriverle in un deposito permanente per l'analisi offline seguente. Sino ad ora

¹⁶ Field Programmable Gate Arrays, FPGAs.

¹⁷ Tale algoritmo di riconoscimento conta di 2500 processori a segnale digitale (Digital Signal Processors, DSPs) disposti su due ordini, il primo che ricostruisce la traiettoria delle particelle il secondo il punto dove queste hanno avuto la collisione. I microprocessori di L1 sono in realtà in numero maggiore, bisogna considerare anche quelli secondari o di appoggio per i controlli sui DSPs dei due ordini.

¹⁸ Simulazioni di flussi di dati sono state eseguite con il metodo Monte Carlo per testare il processore del primo livello.

la maggior parte degli esperimenti realizzati classifica gli eventi sulla base di sole considerazioni energetiche, in questo modo si corre il rischio di scartare dati potenzialmente interessanti. Nel caso di BTeV la funzione del rivelatore è di individuare il vertice associato ad ogni interazione, deve selezionare quegli eventi aventi un gran parametro di urto, tipico delle particelle B_s , ed individuare il punto nel quale si ha il loro decadimento posto a distanza di alcune centinaia di microns dalla zona di collisione. Per un'analisi di questo genere è richiesto un complesso algoritmo di riconoscimento, che consenta di individuare ogni singola interazione nel detector.

Il livello 1 di trigger riceve i dati dal pixel detector in Silicio, queste informazioni sono date sotto forma di gruppi di picchi messi insieme prima di essere inviati al dispositivo di rilevazione. Ogni pacchetto trasmesso rappresenta una misura di posizione avente una risoluzione spaziale di 10 μm .

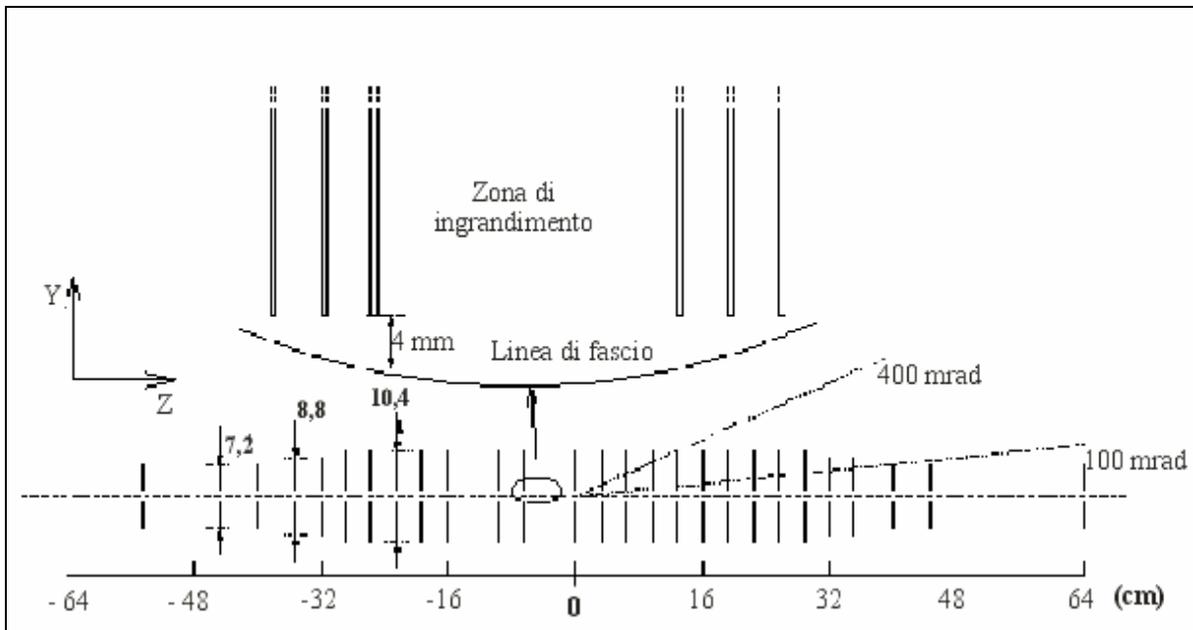


Figura 15: Progetto preliminare del pixel detector, ogni stazione consiste di tre piani di pixels.

Le operazioni eseguite dal trigger con questi dati includono: la classificazione del gruppo di eventi provenienti dal pixel, rilevazione di segmenti di cammino delle particelle ed estrapolazione della zona di fascio interessata, ricostruzione vertice e calcolo dei parametri di impatto, selezione degli eventi sulla base del loro parametro di urto.

Le prestazioni del trigger possono essere divise in due gruppi:

- Smistamento dei gruppi di dati e loro riconoscimento e classificazione secondo il tipo. Tale performance è un aspetto nuovo dell'esperimento BTeV; questa funzione coinvolge un piccolo numero di calcoli matematici e una grande quantità di gruppi di pixel e loro combinazioni, necessarie per ricostruire il cammino. Quest'operazione è svolta da circa 500 matrici con campi programmabili, gli FPGAs, in grado di compiere analisi dei dati in parallelo.
- Operazioni di appoggio alla funzione prima esposta. In questa parte di implementazione del sistema sono impiegate molte risorse di calcolo ed un numero ridotto di campi programmabili. In media sono impiegati 2500 processori a segnale digitale, i DSPs, divisi in due gruppi: il primo usato per la ricostruzione della linea di spostamento delle particelle, il secondo per altre rilevazioni.

La ricostruzione del tracking usa gruppi di segnali a 3 dimensioni provenienti dai pixel detector, questi usano la curvatura del cammino delle particelle dovuta alla presenza di un campo magnetico nella regione del fascio per calcolare i parametri della direzione di moto. In questo modo è possibile valutare la presenza di un punto di vertice in una zona precisa del beam. Secondo il progetto preliminare, ogni stazione di tracking consta di tre piani, l'attuale tendenza è, tuttavia, quella di eliminarne uno, in questo modo si ridurrebbe notevolmente il quantitativo di materiale nel detector.

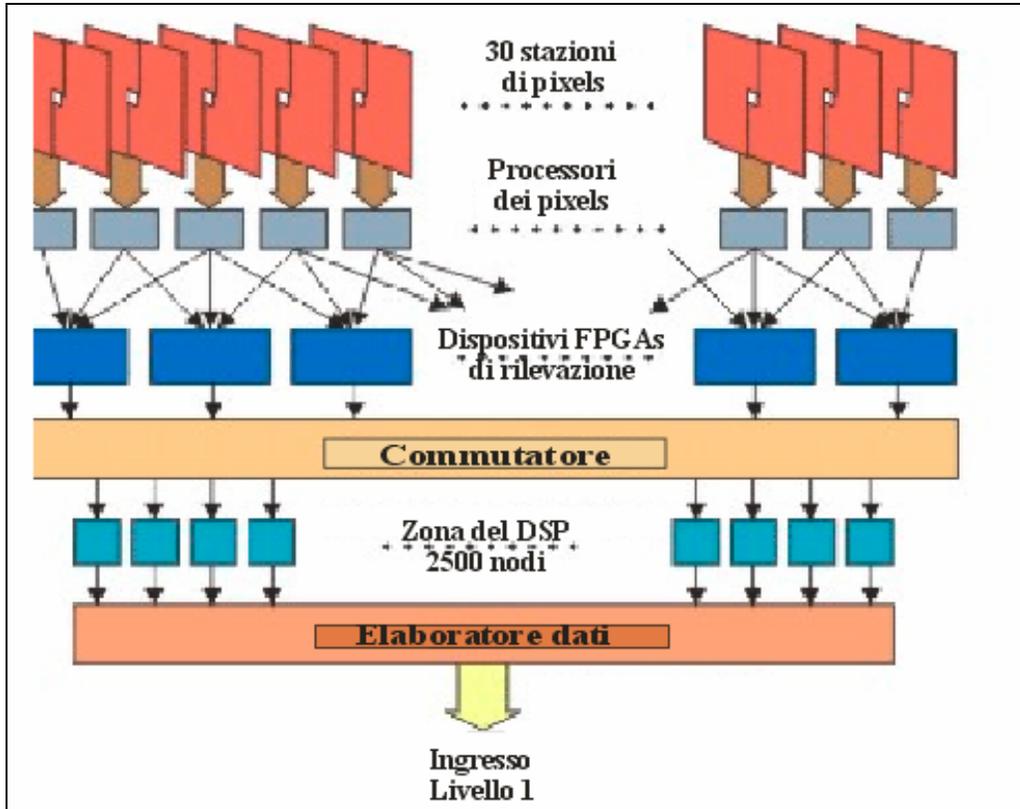


Figura 16: Schema della struttura di trasferimento dati dai sensori in Silicio al trigger di livello 1.

La struttura di calcolo sopra descritta deve essere realizzata in modo da essere molto versatile, devono essere possibili variazioni nelle impostazioni del software, inoltre, qualora ci fosse disponibilità di nuovi e diversi tipi di hardware, essere consentite eliminazioni di parti superflue, eventuale sostituzioni di strutture obsolete e modifiche degli algoritmi usati.

PARTE SECONDA

Capitolo 3

PRINCIPALI MATERIALI UTILIZZATI

In questo capitolo sono presentati i materiali, le loro caratteristiche e proprietà meccaniche, tali informazioni saranno poi riprese nella sezione dedicata allo studio dei vari componenti.

3.1 Rohacell

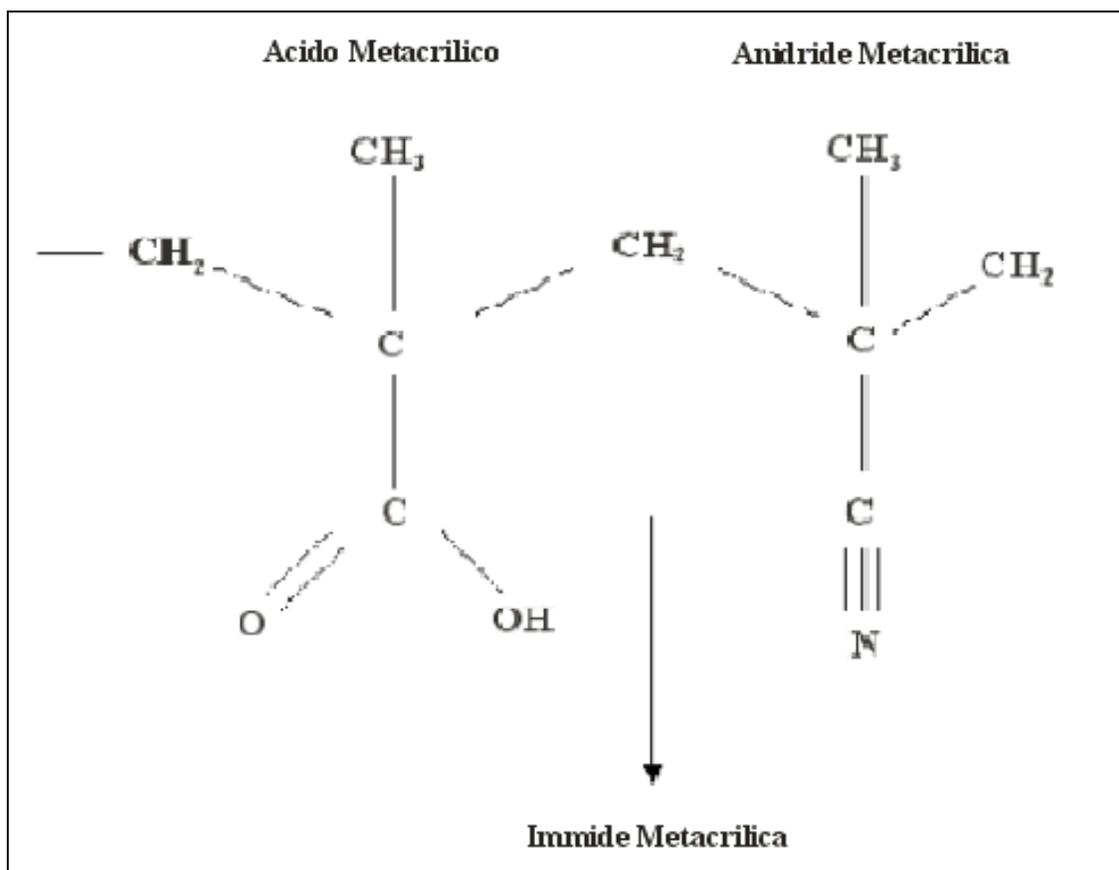


Figura 17: Struttura chimica del rohacell

In figura 18 è riportata la struttura chimica del materiale, uno degli aspetti notevoli di questo espanso è la sua resistenza a solventi organici (come benzene, xilene, monostirene, etc.), a solventi per vernici ed adesivi generalmente a base di combustibili usati per solubilizzare la maggior parte delle specie polimeriche, ha tuttavia una media resistenza all'attacco di specie alcaline. Grazie a

queste sue caratteristiche attualmente trova largo uso in campo aeronautico ed aerospaziale oltre che come isolante e riempitivo in applicazioni mediche e paramediche data la sua non tossicità e la bassa reattività.

Un aspetto interessante da sottolineare è la resistenza meccanica di tale materiale è che, anche se usato come espanso, non ha solo un comportamento parastrutturale, tipico delle altre schiume, ma può sostenere carichi applicati in modo persistente.

Il Rohacell è lavorabile con utensili ad alta velocità disegnati per legno o plastica, senza l'uso di lubrificanti, deve tuttavia essere previsto un impianto per la cattura accurata della polvere. Questo aspetto è di particolare utilità per la realizzazione del supporto, data la necessità di dover praticare dei canali longitudinali con stretta tolleranza lungo tutta la sua lunghezza per poter alloggiare gli straw tubes. Si è infatti pensato di realizzare tali scanalature tramite fresatura, si ha un leggero riscaldamento ($50\div 70^{\circ}\text{C}$) dovuto alla velocità di rotazione dell'utensile. Un altro aspetto di rilievo è la buona affinità con gli adesivi del tipo di quelli comunemente usati per l'incollaggio di parti in legno o polimeriche.

Importante per la stazione di rilevazione BTeV è la resistenza del Rohacell alle radiazioni, tale proprietà è stata verificata in alcuni rivelatori di particelle, tra cui il detector di vertice di Phenix dei Laboratori Nazionali di Brookhaven, nell'esperimento in esame si adopera del Rohacell 71 come supporto di detectors in Silicio.

Questa proprietà è stata verificata con l'esame di campioni di dimensione $100\times 10\times 10\text{ mm}^3$ e densità variabili tra 31 e 71 kg/cm^3 , irradiati da una dose di 0.15 Mrad e successivamente da una di 10 Mrad generati da una sorgente di cobalto 60. Il test di banco eseguito ha dimostrato che non c'è stato un calo significativo nelle proprietà esaminate in seguito all'esposizione dei campioni alla sorgente di 0.15 Mrad. Si ha invece un crollo delle prestazioni meccaniche in seguito

all'esposizione alla sorgente di 10 Mrad specie in quei campioni di densità più bassa, si è provato infatti che il Rohacell 31 irradiato non è in grado di sostenere alcuno peso, la verifica è stata fatta sottoponendo i campioni ad un carico di 400 g. I dati dei tests, raggruppati in tabella servono ad avere idea di quello che è il comportamento meccanico del core dell'interfaccia in seguito all'esposizione prolungata al fascio di particelle.

Condizioni Di Irradiazione	Resistenza a Compressione N/mm ²	Resistenza a Flessione N/mm ²	Deformazione a Frattura mm
Non irradiato	1,5	1,8	6,0
0.15 Mrad	1,5	2,3	5,8
10 Mrad	1,3	1,8	2,5

Tabella 7: Variazione delle proprietà meccaniche in seguito all'esposizione di un campione di Rohacell 71 a radiazioni emesse da una sorgente costituita da cobalto 60, i dati sono utili per valutare quello che dovrebbe essere il comportamento del core in seguito all'esposizione prolungata a radiazioni provenienti dalle particelle.

Una buona formabilità e lavorabilità a caldo sono caratteristiche comuni del rohacell nelle varie tipologie di seguito presentate. I diversi tipi sono riportati nelle pagine seguenti con le caratteristiche, proprietà meccaniche e campi di impiego:

- Tipo A è utilizzato nel campo dell'aviazione e per antenne, è fatto curare in autoclave con una pressione di 0,35 MPa, presenta una buona plasmabilità e formabilità a caldo.
- Tipo EC, con una densità di 75 Mg/m³ presenta una resistenza a compressione di 2,83*10⁻² Pa, inferiore a quella di altri tipi di rohacell. Questo aspetto in genere costituisce un problema per il suo utilizzo in strutture meccaniche, è tuttavia impiegato in schermature EMI ed in altri campi dell'elettronica per le sue buone caratteristiche elettriche.
- Tipo FX, impiegato per la costruzione di parti di pale per mulini di vento e strutture impiegate

in campo aeronautico. Può essere fatto curare in autoclave con pressione di 0.2 MPa.

- I settori di impiego del Rohacell HF sono parti di antenne e componentistica per sale mediche in zone esposte ai raggi X, per la reticolazione si applica una pressione di 0.35 MPa, la tabella 9 riporta caratteristiche e proprietà meccaniche del tipo HF, questa variante di rohacell è caratterizzato da una cella reticolare di dimensione più piccola delle altre tipologie.
- Il Rohacell LS¹⁹ è largamente impiegato per la produzione di diaframmi di altoparlanti, è tipicamente lavorato con stampaggio ed infusione di resina. A differenza degli altri tipi l'LS ha una temperatura di distorsione di 175°C.
- Il Rohacell IG è impiegato per la realizzazione di prototipi, componentistica meccanica, specie aeronautica e navale, produzione di articoli sportivi unità esposte a RX per uso biomedico. Aspetto importante che lo caratterizza è una stabilità alle radiazioni migliore degli altri tipi.
- Rohacell P ha proprietà di anisotropia, è indicato per la realizzazione di sci di alta qualità, è comunemente impiegato con densità superiori a quelle degli altri tipi.
- Il tipo S trova impiego nella costruzione di veicoli ed aerei, rispetto agli altri presenta una migliore formabilità ed è inoltre autoestingente.
- Il Rohacell XT serve per la realizzazione del core di strutture sandwiches ed in generale come espanso il strutture composite, comunemente usato in campo aeronautico ed aereo spaziale.

Per le caratteristiche sopra viste si è ritenuto opportuno impiegare il Rohacell IG, data la necessità di avere un componente all'interno di un rivelatore di particelle, è molto apprezzata la buona stabilità dimensionale di questa tipologia di espanso. In tabella 8 si sono riassunte le principali proprietà meccaniche per tale tipo di Rohacell, la tipologia utilizzata per la realizzazione del supporto per straws è quella contrassegnata dal nome commerciale IG 31.

¹⁹ LS sta per Loudspeakers, cioè altoparlanti.

	Unità di Misura	Rohacell 31 IG	Rohacell 51 IG	Rohacell 71 IG	Denominazione Standard
Resistenza a Compressione	MPa	0.4	0.9	1,5	DIN 53 421/ISO 844 ASTM D 1621
Resistenza al Taglio	MPa	1.0	1.9	1,6	DIN 53 455/ISO 527-2 ASTM D 638
Resistenza al Taglio	MPa	0.8	1.6	0,8	DIN 53 423/ISO 1209 ASTM D 790
Modulo Elastico long.	MPa	0.4	0.8	19	DIN 53 294 ASTM C 273
Modulo elastico trasv.	MPa	13	19	4,0	ISO 527-2 ASTM D 638
Allungamento a Rottura	%	3.5	4,0	4,5	DIN 53 294 ASTM C 273

Tabella 8: Tabella riassuntiva proprietà del rohacell IG utilizzato per la realizzazione dell'interfaccia italiana, tali valori sono stati riportati per diverse tipi di densità.

3.2 Composito: matrice epossidica con rinforzo in fibra di carbonio

Per Materiali Compositi si intendono, genericamente, tutti quei materiali ottenuti dall'unione di due o più materiali al fine di ottenere altri con prestazioni superiori.

Il composito impiegato, la definizione del materiale utilizzato, le sue caratteristiche e le proprietà meccaniche ottenute dopo il processo di cura nonché alcune proprietà del prodotto umido sono riportate nelle tabelle di seguito, i dati non presenti non sono stati indicati dal fornitore in quanto non ritenuti significativi.

3.2.1 Definizione del materiale

Identificazione del pre-preg

Nome commerciale	T1S5/X751/135 Oppure 751-42%-HM-170-350
Descrizione	Fibra di carbonio ad alto modulo unidirezionale (125°C) curato con resina epossidica
Nome industriale	CYTEC ENGINEERED MATERIALS Ltd

Identificazione della fibra

Nome commerciale	TENAX J-HMA 2236 750 tex f 12000 t0
Nome industriale	Toho Rayon Co
Densità (Mg/m ³)	1,78 valore nominale (1,75 minimo – 1,81 massimo)
Numero di filamenti/tow	12000
Avvolgimento	Nessuno
Tipo di dimensione	Epossidica
Dimensione nominale %	1,0
Diametro nominale dei filamenti (µm)	6,75
Modulo elastico (GPa)	358 valore nominale (348 minimo – 368 massimo)
Elongazione tensile (valore nominale)	0,7%
Tenacità a trazione (valore minimo)	2648 MPa

Identificazione della resina

Nome commerciale	Cycom X751 Epoxy
Nome industriale	CYTEC ENGINEERED MATERIALS ltd
Densità (Mg/m ³)	1,25 valore nominale (1,18 minimo – 1,32 massimo)

3.2.2 Caratteristiche fisiche

Quantitativo di resina nel pre-preg (valori in peso)	42±2%
Peso della fibra per unità d'area	170±8 g/cm ²
Massa di un piano per area unitaria	291±15 g/cm ²
Spessore di un piano dopo la cura	0,12÷017 mm
Densità del composito	1,30÷1,49 g/cm ³
Quantitativo della fibra in volume	48÷54 %

3.2.3 Condizioni di test

Condizioni di invecchiamento: 45°C con 84% RH		
R.T.=23°C	L.T.=-55°C	H.T.=82°C per campioni secchi
		H.T.=70°C per campioni invecchiati

Temperatura di massimo servizio del materiale pari a 70°C.

Nei seguenti paragrafi le proprietà misurate nella direzione parallela alle fibre sono normalizzate al 50% in volume delle fibre.

3.2.4 Moduli elastici (valori in GPa)

Trazione

	NON INVECCHIATO (Secco)		
	R.T.	L.T.	H.T.
E_{xx}^{20}	173 (4,3%)	164 (1,8%)	174 (1,4%)
E_{yy}	7,75 (4,1%)	7,97 (4,3%)	7,49 (4,5%)
G_{xy}	4,36 (4,2%)	4,87 (2,7%)	3,77 (9,6%)
ν			

	INVECCHIATO (Umido)		
	R.T.	L.T.	H.T.
E_{xx}	157 (8,4%)	-	153 (9,3%)
E_{yy}	7,13 (1,7%)	-	6,85 (7,7%)
G_{xy}	4,50 (1,4%)	-	3,39 (5,2%)
ν	0,21 (8,9%)-	0,22 (14,5%)-	-0,25 (8,3%)

Compressione

	NON INVECCHIATO (Secco)		
	R.T.	L.T.	H.T.
E_{xx}	179 (9,0%)	168 (7,4%)	171 (6,1%)
E_{yy}	8,49 (9,6%)	8,36 (6,3%)	7,27 (6,6%)

²⁰ Il modulo viene valutato nell'intervallo in cui ε varia tra 0,05% e 0,25%
 $E_{xx}(RTD)=2,83$ GPa e $E_{xx}(HTD)=154$ GPa.

Flessione

		NON INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
E^{21}_{xx}		146 (2,8%)	147 (6,1%)	-
E_{yy}		7,10 (5,7%)	7,59 (4,5%)	6,02 (8,3%)

		INVECCHIATO (Umido)		
		R.T.	L.T.	H.T.
E_{xx}		143 (5,2%)	-	138 (2,7%)
E_{yy}		7,13 (1,7%)	-	6,85 (7,7%)

3.2.5 Tenacità a frattura (Microstrain)

Tensione

		INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
ϵ_{xx}		7525 (12,5%)	6421 (13,1%)	7696 (6,5%)
ϵ_{yy}		4306 (13,3%)	4416 (11,7%)	4682 (7,5%)

²¹ Il modulo flessionale è preso nell'intervallo in cui ϵ varia tra 0,05% e 0,25%, $E_{xx}=148$ GPa.

3.2.6 Tenacità con carichi statici

Stress ultimo, valori in MPa

Trazione

		NON INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	1243 (7,0%)	1132 (12,8%)	1296 (13,1%)
	Valore min.	864		
	Valore max	1022		
σ_{yy}	Valore medio	31,8 (11,9%)	35,1 (9,7%)	33,8 (8,7%)
	Valore min.	20		
	Valore max	25		

		INVECCHIATO (Umido)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	1103 (5,9%)	-	1160 (6,0%)
	Valore min.			678
	Valore max			876
σ_{yy}	Valore medio	18,6 (8,1%)	-	16,7 (6,4%)
	Valore min.			
	Valore max			

Compressione

		NON INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	862 (6,0%)	806 (4,1%)	641 (8,0%)
	Valore min.	478		
	Valore max	636		
σ_{yy}	Valore medio	173 (3,1%)	198 (8,4%)	131 (3,4%)
	Valore min.	154		
	Valore max	159		

		INVECCHIATO (Umido)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	626 (10,2%)	-	588 (8,3%)
	Valore min.			399
	Valore max			477
σ_{yy}	Valore medio	150 (4,5%)	-	103 (4,9%)
	Valore min.			86
	Valore max			93

Sforzo di taglio a rottura (valori in MPa)

		NON INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
τ_{xx}	Valore medio	68,1 (5,1%)	67,9 (4,6%)	69,5 (4,7%)
	Valore min.	53		
	Valore max	57		
τ_{yy}	Valore medio	95,5 (4,9%)	94,2 (4,7%)	64,3 (2,1%)
	Valore min.	63		
	Valore max	77		

		INVECCHIATO (Umido)		
		R.T.	L.T.	H.T.
τ_{xx}	Valore medio	62,1 (6,0%)	-	62,9 (5,2%)
	Valore min.			26
	Valore max			41
τ_{yy}	Valore medio	73,7 (8,7%)	-	54,8 (3,1%)
	Valore min.			42
	Valore max			47

Stress a rottura per flessione

		NON INVECCHIATO (Secco)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	1140	1281	942
	Valore min.	902	(4,5%)	(7,4%)
	Valore max	958		
σ_{yy}	Valore medio	63,2	70,2	46,4
	Valore min.	(4,8%)	(6,6%)	(5,0%)
	Valore max			

		INVECCHIATO (Umido)		
		R.T.	L.T.	H.T.
σ_{xx}	Valore medio	864		833
	Valore min.	(8,6%)	-	530
	Valore max			654
σ_{yy}	Valore medio	39,4		27,1
	Valore min.	(7,7%)	-	(7,0%)
	Valore max			

3.3 Lega di alluminio: Anticorodal

Specifica	Unità di misura	Valori
Composizione chimica	% in peso	Si 0.7÷1.3/Fe 0.5 max/Cu 0.1 max/Mn 0.4÷1.0/Mg 0.6-1.2/Cr 0.25 max/Zn 0.2 max
Densità	Mg/m ³	2.70
Modulo elastico	MPa	69000
Coefficiente di espansione lineare K-1	°C ⁻¹	23.4*10 ⁻⁶ nell'intervallo 20°÷100°C

Tabella 9: Composizione chimica e proprietà dell'anticorodal.

L'alluminio 6061, conosciuto con il nome commerciale di Anticorodal, è una lega con medie proprietà meccaniche, presenta una buona resistenza alla corrosione e buone caratteristiche di saldabilità, in particolare si salda con processi TIG, MIG o a resistenza. E' utilizzata per la realizzazione di componentistica meccanica e strutture saldate.

Questo lega è utilizzata per la realizzazione del frame, la motivazione che ha portato alla sua scelta è stata la sua amagneticità, il reticolo cubico facce centrate del materiale di base impedisce infatti eventuali magnetizzazioni ed impedisce deviazioni del fascio di particelle, è questa una specifica di importanza fondamentale ai fini dell'esperimento.

3.4 Kapton

Specificata	Unità di misura	valore
Densità	Mg/m ³	1.18
Modulo elastico	GPa	4.5÷10
resistenza a trazione	MPa	165
Allungamento a rottura	%	50
Resistenza a trazione	Kg/Cm	4.5 Min.

Tabella 10: Kapton ,proprietà e caratteristiche.

Il Kapton (C₂₂H₁₀N₂O₅) è una materiale polimerico a base di poliestere, ampiamente utilizzato nel campo dell'elettronica dei circuiti stampati, particolarmente apprezzata è la sua buona resistenza alla temperatura, mantiene buone proprietà meccaniche fino a 220 °C. Ampiamente impiegato per una varietà di domande in diversi settori dell'industria e della ricerca. Una sua peculiare caratteristica è quella di mantenere le sue proprietà fisiche, meccaniche, chimiche ed elettriche anche se ridotto in film sottile. Del Kapton alluminato viene utilizzato per la realizzazione degli straws di BTeV.

3.5 Parylene

Il parylene è il nome commerciale di una famiglia di polimeri conosciuta con il termine tecnico di poly-para-Xylylene. Una caratteristica che contraddistingue questa famiglia di polimeri dalle restanti altre è la modalità di applicazione sul substrato. Questi collanti sono infatti depositati da fase vapore come unità monomeriche, durante la fase di presa si ricombinano a formare i corrispondenti polimeri e conseguono le proprietà meccaniche desiderate.

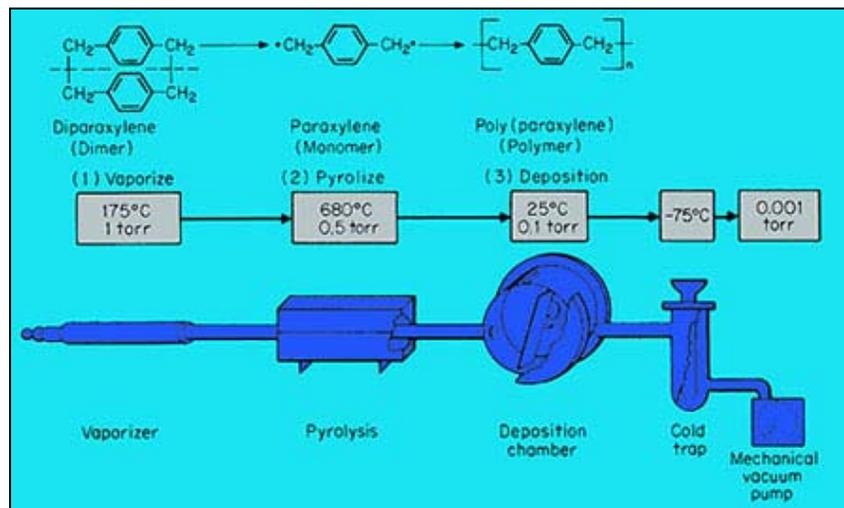


Tabella 11: Schema di processo del parylene.

E' usato come vernice protettiva o come collante per diversi tipi di materiali quali il metallo, il vetro, la carta, i materiali plastici e ceramici. La polimerizzazione sul substrato avviene in modo spontaneo, non sono quindi necessari catalizzatori, la deposizione avviene a temperatura ambiente, se applicato sotto vuoto si ha un maggior controllo dello spessore dello strato di rivestimento e della sua composizione chimica.

	Unità di misura	Parylene N	Parylene C	Parylene D
Resistenza a trazione	MPa	45	69	76
Carico di snervamento	MPa	43	55	62
Modulo elastico	MPa	2400	3200	2800
Allungamento a rottura	%	40	200	10
Densità	g/cm ²	1.110	1.289	1.418
Temperatura di fusione	°C	410	290	380
Coefficiente di espansione lineare	10 ⁻⁵ /°C	6.9	3.5	NA
X ₀	mm	286	286	286
Lunghezza di radiazione	%	0.007	0.007	0.007

3.6 Lunghezza di radiazione

Trattandosi di un esperimento che interessa la fisica delle alte energie, si ritiene necessario in questa sede introdurre il concetto di lunghezza di radiazione, dovendo spesso essere ripreso anche nel proseguo del lavoro.

Def: la lunghezza media in un specifico materiale nel quale una particella relativistica carica perde il 67% della sua energia per assorbimento da parte della materia attraversata.

La relazione matematica che permette di calcolare tale grandezza per qualsiasi elemento o lega è l'equazione 1:

$$1/X_0 = \frac{4\alpha N_A Z(Z+1) r_e^2 \log(183 Z^{-1/3})}{A} \quad (1)$$

con

α = Costante dipendente dalla struttura ($\approx 1/137$)

N_A = Numero di Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23}$)

Z = Numero atomico del materiale attraversato²²

A = Peso atomico del materiale attraversato²³.

R_e = Raggio dell'elettrone ($2,818 \cdot 10^{-13}$ m)

²² Per una lega si usi il numero atomico ponderato.

²³ Per una lega si usi il numero atomico ponderato.

Capitolo 4

MICROSTRIPS E STRAW TUBES

4.1 Rivelatori strip in silicio (microstrip)

Il primo dispositivo operativo di questo tipo, è stato costruito dalla CERN-Munich group per uno studio sperimentale sull'interazione adronica di particelle a breve periodo di estinzione in alta energia. La fig. 19 mostra la struttura di questo sensore, esso è fatto di un wafer di silicio cristallino n-drogato, con una resistività di $2 \text{ k}\Omega\text{cm}$, un diametro di 50 mm e uno spessore di $280 \text{ }\mu\text{m}$. Un lato del cristallo è alluminizzato, dalla parte opposta un'area sensibile di $24 \times 26 \text{ mm}$ è ricoperta con un nastro fissato con Boro di materiale p drogato.

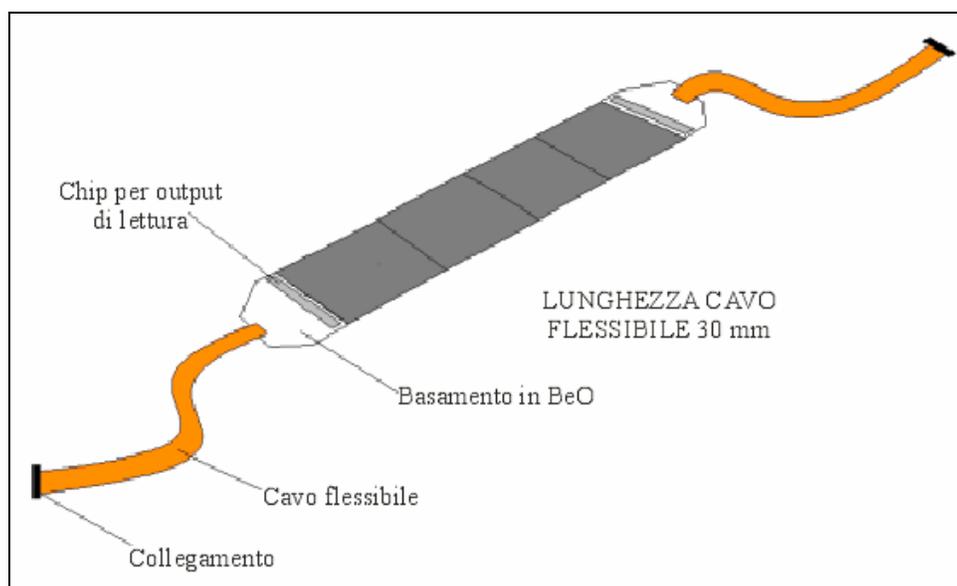


Figura 18: Configurazione del sensore della microstrip in Silicio con denominazione componenti e dimensioni del cavo flessibile.

Una particella relativistica carica produce 25000 coppie di buchi elettronici quando attraversa i $280 \text{ }\mu\text{m}$ di silicio. Il segnale registrato dallo strip, collegato agli elettrodi ogni 10 ns, misura la posizione delle particelle che attraversano. Per questi detectors ci sono 1200 strips di

12000x36 mm impiantati con un'inclinazione di 20 μm . Per ridurre il numero delle letture di output, solo ogni 3 strips (intervallate da 60 μm) c'è un canale di uscita (spaziate di 120 μm). La carica prodotta dalle particelle è divisa tra le confinanti strips tramite accoppiamento capacitivo. La posizione delle particelle è ottenuta calcolando il centro di gravità delle cariche collegata a più strips con canali di uscita, la risoluzione spaziale ottenuta dai detectors è stata di 4.5 μm per canali di uscita posti ogni 60 μm .

Se un campo magnetico di 1.68 Tesla è applicato parallelamente allo strip con canale di uscita, la forza di Lorenz fa spostare i portatori di carica in modo che la coordinata misurata è spostata in media di 10 μm . La risoluzione spaziale, ottenuta se ogni strip ha un canale di uscita, è di 2.8 μm . Questa risoluzione può essere ottenuta se l'elettronica associata con ogni strip può essere impiantata mediante la tecnica VLSI sullo stesso wafer che forma il detector. Una recente innovazione prevede l'integrazione di 60 canali di preamplificazione, Integrandoli su un chip collegato e fissato al detector si ha una dimensione dei sensori limitata a 70x70 mm.

4.1.1 Microstrip in BTeV

Il pixel detector in silicio di BTeV contiene 30 stazioni poste sotto vuoto attorno alla beam-pipe del Tevatron, il rivelatore risiede all'interno del magnete di analisi e la sua posizione impone rigide costrizioni ai vincoli meccanici del supporto, agli impianti di raffreddamento, agli schermi RF, all'alimentazione, ed al sistema di vuoto.

Il detector in silicio contiene 1600 cavi elettrici che portano segnali dal rivelatore, il carico di calore da ogni frammento di lettura è 0.5 W/cm per un totale di 2.5 KW, un sistema di raffreddamento mantiene la temperatura di esercizio tra -5° C e -10° C con un'oscillazione di $\pm 2^\circ$ C.

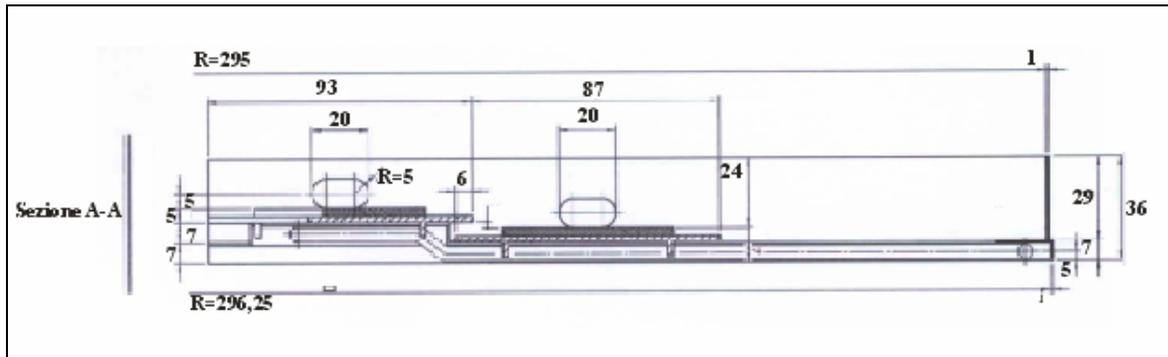


Figura 19: Sezione trasversale microstrip di BTeV.

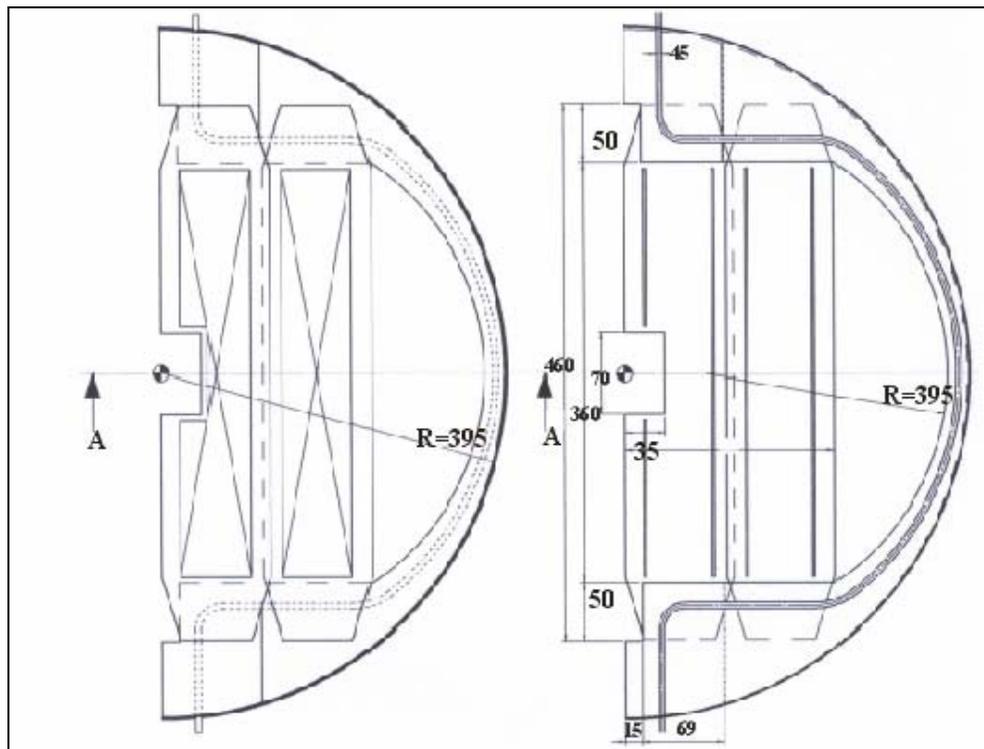


Figura 20: Microstrip BTeV pianta.

I sensori devono essere messi all'interno del magnete con un campo magnetico di 1.6 Tesla, sono, inoltre, posti in una camera da vuoto con una pressione di 10^{-7} torr. I vantaggi di questa

disposizione sono di eliminare le relazioni tra acqua e vuoto, e di ridurre la possibilità che la miscela si disperda nel substrato di carbonio. In fase operativa, essi devono essere tenuti a 6 mm di distanza dalla beam-line, mentre, durante la fase di iniezione, sono allontanati dal dispositivo di azionamento di 20 mm.

Ogni pixel richiede tipicamente un giorno per essere correttamente posizionato, la tolleranza di errore massima consentita è di 50 μm , mentre la dilatazione per effetto termico dovuto all'esercizio deve essere limitata a 2 μm . In ultimo è richiesto uno scudo RF tra il pixel detector ed il liquido refrigerante circolante per avere una protezione adeguata elettromagnetica.

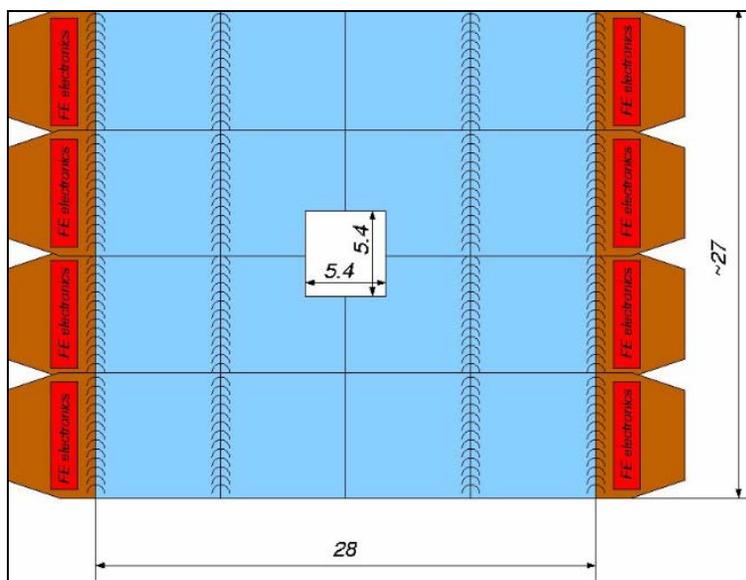


Figura 21: Posizione delle micro-strips di BTeV.

Lo spettrometro ha un angolo di ricezione di $300 \times 300 \text{ mrad}^2$. Ogni materiale posto all'interno di quest'angolo, deve essere di dimensioni piccole il più possibile per ridurre interazioni di tipo primarie, la quantità di materiale posto all'interno dell'angolo di accettazione è circa 1,25% di una lunghezza di radiazione per ogni singolo piano di silicio.

I pixels di silicio sono posti su substrati, come mostrato in Figura 20, ce ne sono due per stazione per un totale di 30 nel rivelatore. Durante la fase di rivelazione del segnale, i rivelatori sono posizionati in modo che le radiazioni viaggino attraverso un buco, di dimensioni 12x12 mm, praticato all'interno dei substrati stessi; mentre durante la fase di iniezione, sono allontanati dalla linea su cui si muovono le particelle.

Il substrato è realizzato in grafite prodotta dall'ESLI²⁴, allineato secondo la direzione di sollecitazione del rivelatore. La lunghezza di radiazione di tale materiale, supposta pari a 440 cm, è solo di 0.02% per una spessore di 0.88 mm. E' importante sottolineare che il carbonio ha un coefficiente di espansione termica simile a quello del silicio, questo elimina problemi di distacco tra le superfici di appoggio ed i rivelatori. Schiuma di carbone o grafite pirolitica sono possibili alternative a tale materiale.

Per tenere il pixels in silicio alla temperatura di corretto funzionamento è adoperato un sistema di raffreddamento alimentato con glicol al 40% in volume ed acqua, 1 L/min attraverso ogni substrato. I tubi di raffreddamento sono realizzati in carbone, prodotto anch'esso dall'ESLI. I substrati sono tenuti in posizione da fibre di carbonio aventi la forma di mezzo cilindro, sempre dello stesso materiale, sono i supporti posti alle estremità del substrati per posizionarli ed incollarli all'interno del semicilindro, la forma delle fibre è realizzata al fine da aumentare la rigidità nella direzione di sollecitazione, da calcoli fatti si hanno abbassamenti di 0.05 mm dovuti alla forza peso.

²⁴ Energy Science Laboratories, Incorporated (ESLI), San Diego.

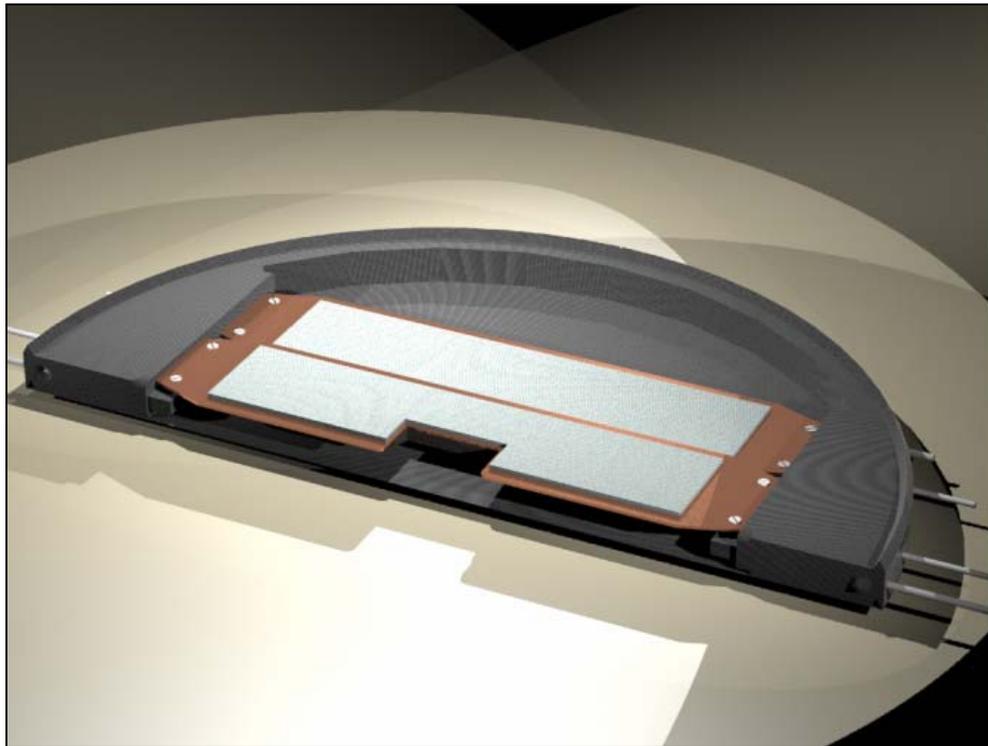


Figura 22: Disposizione delle due microstrips all'interno della mezzaluna in composito.

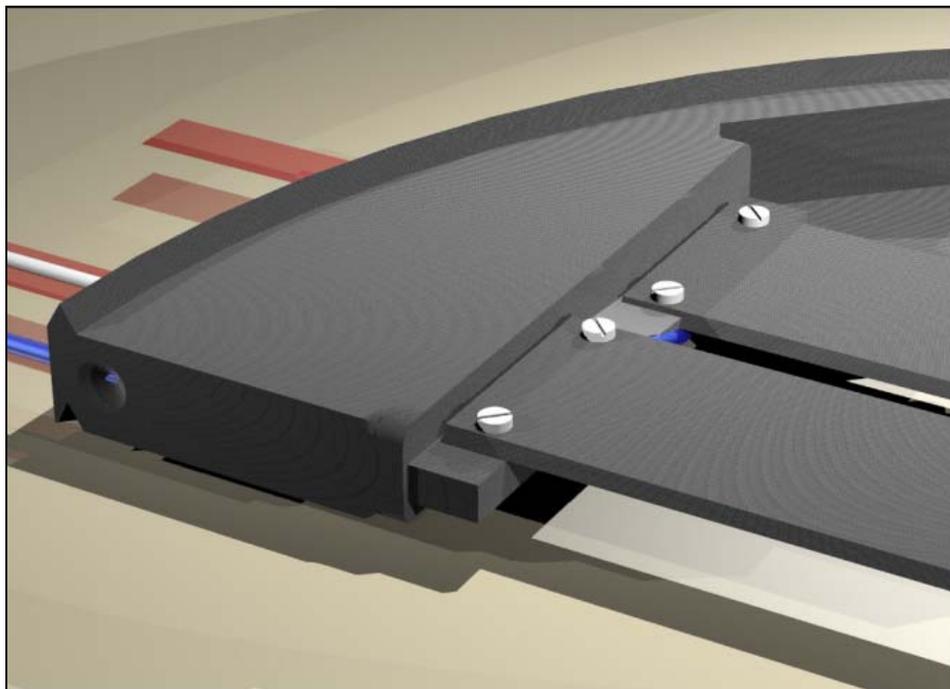


Figura 23: Parte di collegamento tra le microstrips e il supporto, in azzurro è rappresentato l'impianto di raffreddamento per l'elettronica, realizzata di colore rosso.

Cavi flessibili Pyralux AP²⁵ alimentano e trasmettono informazioni al e dal pixel, ci sono 28 cavi ad alta tensione per ogni substrato. La dimensione totale di materiale in lunghezza di radiazione, includendo il substrato, il carbone dei tubi di raffreddamento e la miscela di glicol di acqua, è di 0.17%.

4.2 Straws: Cavità cilindriche a spostamento

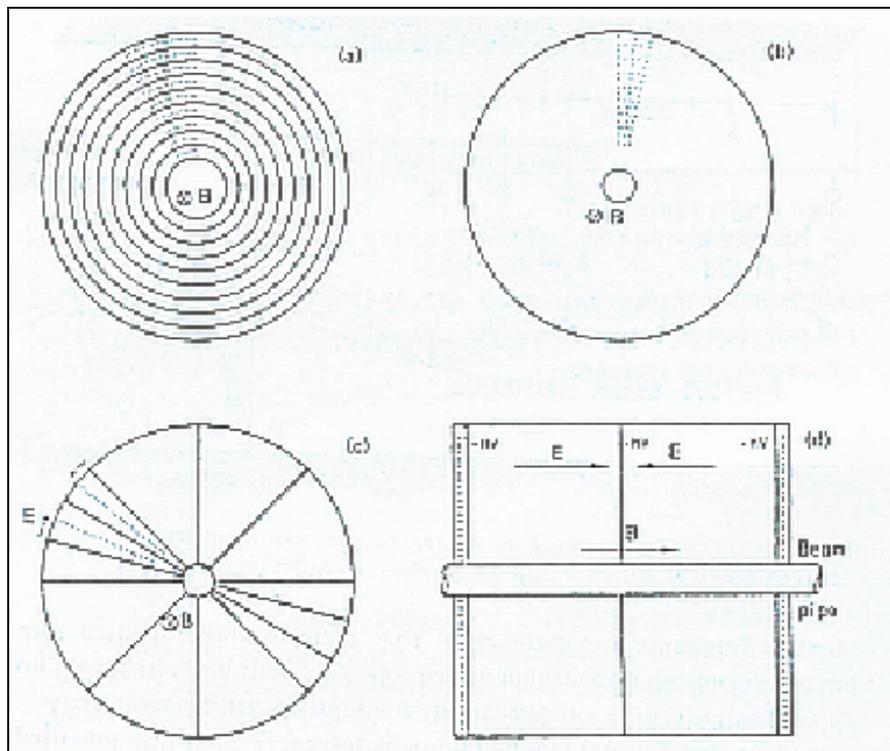


Figura 24 bis: Rappresentazione schematica degli straws.

Per eseguire esperimenti in dispositivi con fasci di elettroni che collidono sono spesso impiegati rivelatori con campi magnetici solenoidali intorno ai punti di interazione. In coordinate cilindriche le componenti del campo sono $B_r=B_\varphi=0$ e $B_z \neq 0$. La simmetria cilindrica del campo

²⁵DuPont Electronic Materials, Research Triangle Park.

richiede quindi un rivelatore di posizione con analoga geometria. Questi detectors misurano la direzione iniziale delle particelle nei punti di interazione ed il loro raggio di curvatura nel campo magnetico. Le configurazioni geometriche di 4 di tali rivelatori sono mostrate in figura 24 bis.

Il primo detector di questo tipo fa uso di campi cilindrici con cavità proporzionali o cavità scintillanti per misurare le posizioni di spostamento (tracking) figura 24 bis (a). I fili metallici anodici delle cavità proporzionali sono tensionati parallelamente al campo magnetico B , il campo elettrico E ha orientazione radiale. Il cammino degli elettroni nel campo elettrico è deflesso dalle forze di Lorenz nella direzione γ , ciò introduce un errore che è, comunque, piccolo in questo caso perché il cammino di drift è corto, generalmente meno di 10 mm. Per la seconda generazione di questi rivelatori di tracking sono usate cavità cilindriche di drift, queste sono costituite da più di 20 campi cilindrici simmetrici di celle di drift. Le linee di campo elettrico giacciono nel piano (r, γ) perpendicolari al campo magnetico assiale (fig. 3.11 (b)). Questo campo è generato da una adeguata disposizione di filamenti a potenziale i quali sono paralleli tra loro e convogliano il filamento (anodo) di segnale al centro della cella. Circa la metà dei filamenti di segnale sono paralleli al campo B , mentre gli altri sono obliqui a formare un angolo γ da ambo le parti (ad esempio $\gamma = \pm 4$) con riferimento a tale asse. Questo permette la ricostruzione della posizione z del cammino, anche se con precisione limitata. Al fine di ridurre il numero ed i filamenti a potenziale, si può omettere di chiudere la cella di deviazione nella direzione radiale (geometria a cella aperta). Pertanto l'omogeneità del campo elettrico e la linearità dell'impulso altera la relazione di tempo tra impulso e traiettoria.

4.2.1 Straws in BTeV

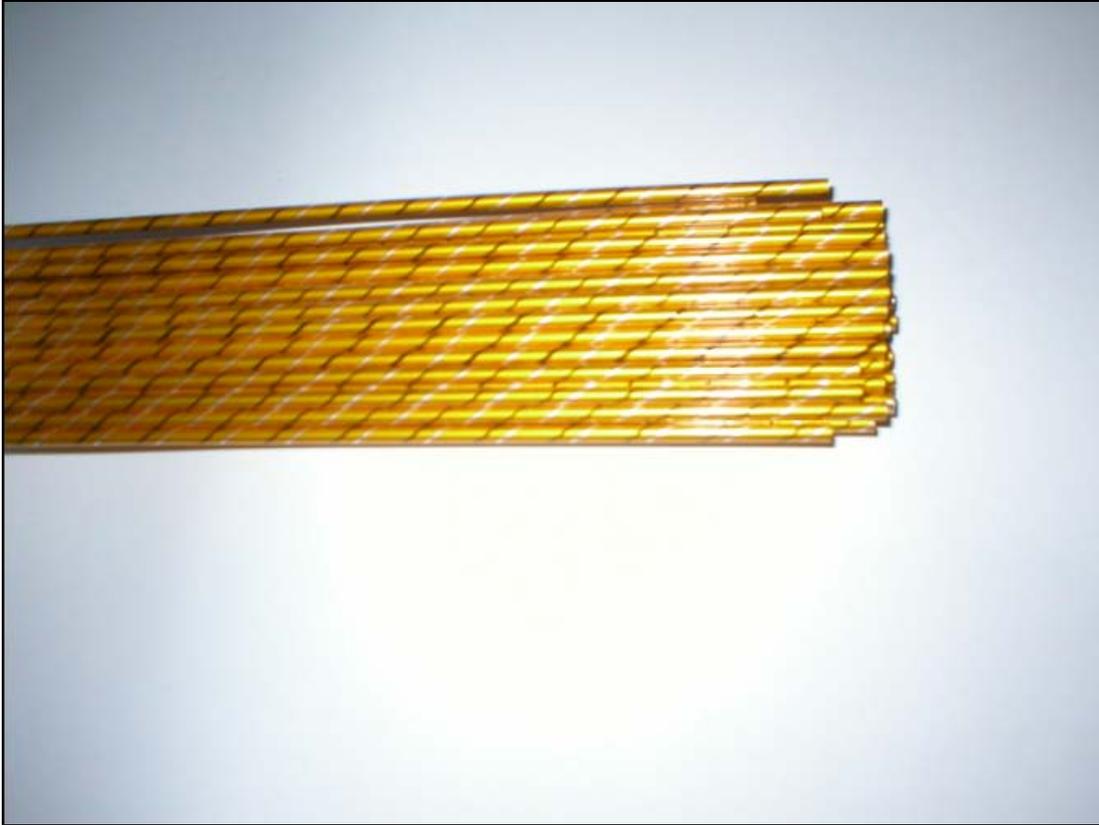


Figura 24: Straw tubes di BTeV.

Gli straws prodotti sono costituiti da un rivestimento a spirale dello spessore di 0.012 mm costituito da kapton alluminato, lo spessore dell'alluminio è di 0.1 μm . Un rivestimento di kapton è applicato sul nastro ricoperto ed un secondo nastro sempre di kapton, spessore 0.012 mm, è posto sopra quest'ultimo. Lo spessore complessivo dello straw è di 0.03 ± 0.01 mm che rappresenta circa $1 \cdot 10^{-4}$ della lunghezza della radiazione. Può essere raggiunta una risoluzione inferiore ai 40 μm .

Dei filamenti di Tungsteno placcati d'oro con un diametro di 0.03 mm sono usati come anodo, la resistenza elettrica è stimata essere di 85 Ω/m mentre il massimo carico sopportabile è di 1.8 N. Il filamento che funge da anodo è fissato in una capsula di rame placcata d'oro, questa ha un

foro interno di 0.01 mm o 0.02 mm con una zona di serraggio di 6 mm dal diametro esterno di 0.07 ± 0.01 mm. La sezione della capsula è conica ed ha un'altezza di 10 mm, rivestita da una resina acetale, conferisce una rigidità meccanica e lo posiziona al centro dello straw.

In sezione lo straw appare come un cilindro in alluminio con un diametro esterno di 4.00 ± 0.01 mm. La zona esterna della capsula permette alla filamento di muoversi lungo l'asse del foro posto nella parte terminale mentre tirando lo straw gli si conferisce la tensione richiesta. Lo straw contiene un foro in cui sono ospitate le capsule dei filamenti, i cosiddetto *twisters*²⁶, e fornisce l'ingresso e la fuoriuscita dei gas dagli straws.

L'incollaggio avviene a temperatura ambiente per un tempo di 16 ore sotto l'azione di uno sforzo tensile di 126 kg/cm^2 . Quando la colla ha fatto presa le sezioni sono inserite e gli straws sono tensionati a 25 N. Dopo il bloccaggio delle parti terminali il filamento è inserito in una capsula da un'estremità dello straw, tensionato a 1 N e fissato all'estremità opposta.

Impedenza di ingresso	300 Ω
Impedenza d'uscita	50 Ω
Guadagno	1-3 V/mA
Charge guadagno	20-60
Range dinamico	2 V
Tempo di settaggio output	2 ns
Potenza fornita	± 6 V
Consumo di potenza	50 mV

Tabella 12: Caratteristiche del pre-amplificatore.

I preamplificatori sono montati su circuiti stampati, l'impedenza in ingresso è di 300 Ω , il circuito opera con ± 6 V dissipando 50 mV per canale. Il massimo valore di output prima della saturazione è impostato ai 2 V. Il gas impiegato per il prototipo è dimetile con purezza del 99.8%

²⁶ Per la descrizione della componentistica costituente lo straw si guardi il seguito di questo capitolo.

con una sovrappressione di circa 20 mbar. Il guadagno del gas è misurato usando gli impulsi originati da un singolo elettrone prodotti dalla fotoemissione dalla superficie del catodo.

La dipendenza della risoluzione spaziale sulla distanza di drift si trova essere in accordo con un semplice modello che considera il contributo dovuto alla ionizzazione statistica ed all'agitazione nel tempo di misura. Il contributo dovuto alla diffusione degli elettroni è di circa 7 μm per ogni mm di distanza dal drift. A distanze più brevi di 2÷3 mm, il contributo dovuto all'agitazione durante la misura predomina su quello di risoluzione spaziale.

La lunghezza degli straws è un parametro importante per determinare l'eccentricità e di conseguenza gli errori sistematici e la risoluzione spaziale. L'eccentricità degli straws può essere misurata dalle distribuzioni dei tempi di drift e gli errori sistematici possono essere corretti. Con questa metodologia di correzione è stata ottenuta una risoluzione spaziale migliore di 40 μm con straws di 2 m di lunghezza.

4.3 Descrizione delle parti costituenti gli straws

In questa sezione sono descritte le varie componentistiche, con le loro dimensioni e materiali che, assemblate, andranno a costituire l'interfaccia di realizzazione italiana. Laddove possibile si cercherà di mettere in evidenza le eventuali differenze rispetto alle componentistiche della soluzione americana. Le parti descritte in queste pagine saranno successivamente richiamate nelle altre sezioni specie quando è descritta l'intera procedura di montaggio dell'interfaccia.

La componentistica trattata è:

- End-plate;
- End-plug;

- Terminali per i filamenti di tungsteno;
- Twisters;

4.3.1 End-plate

Per evitare che ci siano interferenze tra questo componente e il fascio di particelle esso è realizzato in lega di alluminio 6061, conosciuta con il nome commerciale di Anticorodal, il reticolo cubico facce centrate di questo materiale assicura infatti un comportamento amagnetico. Gli end-plates sono posati come terminazioni dell'interfaccia ed in essi si vanno ad inserire gli straws, la loro sezione prevede quindi la presenza di 45 fori disposti su 3 righe da 15 l'una sfasate di un distanza pari a quella del raggio dello straws.

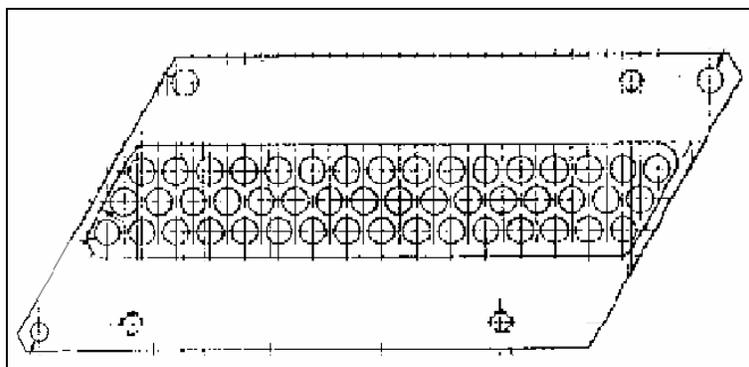


Figura 25: Pianta dell'end-plate della soluzione americana presa dai disegni di progetto originali. La dimensione orizzontale massima è di 90.195 mm.

Nel caso della soluzione americana l'end-plate deve essere più spesso, non deve solo tenere allineati gli straws ma deve anche provvedere a tenere tensionati questi rivelatori, da qui la necessità di una struttura maggiormente massiccia e meglio ancorata all'interno della struttura in

composito.

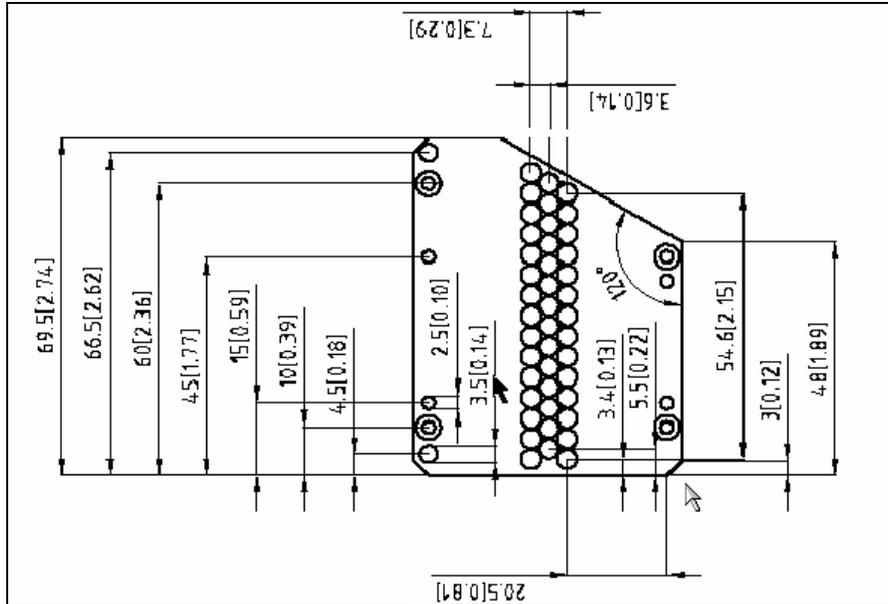


Figura 26: File AutoCad: immagine con quote in mm [pollici] dell'end-plate italiano.

La forma e le dimensioni dell'end-plate dell'interfaccia italiana sono differenti. Per quanto riguarda la sua funzione, c'è da sottolineare come non è richiesta una rigidità molto elevata come nel caso dell'end-plate realizzato dal gruppo di Fermilab, dal momento che gli straw tubes sono incollati all'interno dell'interfaccia l'end-plate ha come uniche funzioni quelle di evitare eventuali disallineamenti delle terminazioni dei sensori e di tenere in posizione assiale il filamento di tungsteno. In quest'ultima funzione sono coadiuvati anche dai terminali in rame di cui si fa cenno in seguito



Figura 27: Foto di due end-plate italiani, lo spessore e le dimensioni sono differenti da quelli da usarsi per la soluzione americana.

4.3.2 End-plugs

Questi componenti sono posti al termine di ogni singolo straws, sono realizzati in vetroresina ed hanno una funzione isolante, servono per evitare cadute di potenziale prima del trasferimento del segnale prodotto dagli straws all'elettronica. Vengono incollati con della colla conduttiva agli straws sull'end-plate, di seguito si riportano i disegni originali ed alcuni campioni fotografati.



Figura 28: Foto di due end-plugs di BTeV in vetroresina.

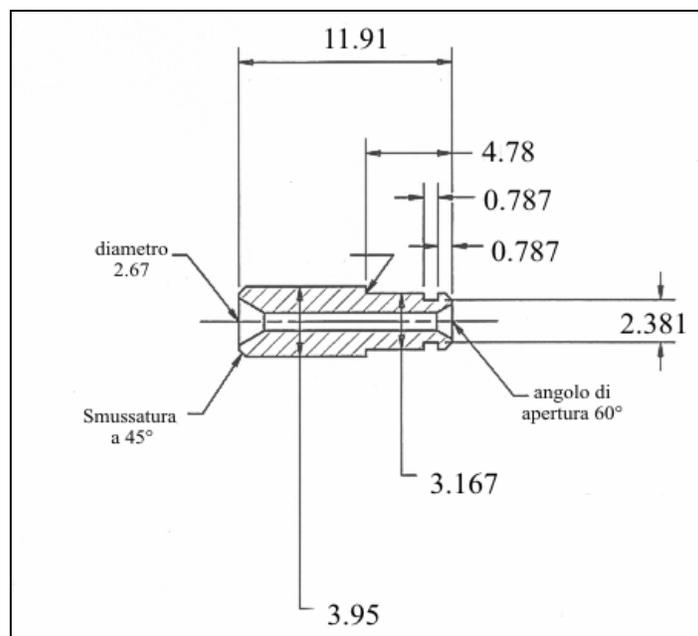


Figura 29: Progetto originale con quote in mm dell'end-plug di BTeV.

4.3.3 Terminali per i filamenti di tungsteno

Sono realizzati in rame o ottone, sono incastrati intorno al filamento di tungsteno ed hanno la funzione di tenerlo tensionato ed allineato con l'asse dello straw, in figura 31 alcuni campioni di questi componenti. La loro dimensione è tale da permettere di essere inseriti all'interno degli end-plugs. Sono vincolati ad essi mediante una colla di tipo conduttivo²⁷.



Figura 30: End-plugs, terminalini e twisters dell'interfaccia italiana.

²⁷ Della colla di cui si parla non sono pervenute le specifiche, è di tipo bicomponente e realizza una sospensione di Argento per avere trasferimento di carica. L'impiego di tale adesivo è importante per il corretto funzionamento dell'elettronica dello straw.

4.3.4 Twisters

Sono realizzati in vetroresina, hanno un diametro di 4 mm e la forma a spirale. Hanno la funzione di evitare delle variazioni nell'eccentricità dello straw in cui si vanno ad inserire. Il processo di montaggio prevede di impregnarli in colla termofusibile, aspettare una parziale essiccazione dell'adesivo quindi inserire i twisters all'interno degli straws a distanza di 70, 80 cm l'uno dall'altro. Per il posizionamento si ricorre a barre rettificate con diametro pari a 4 mm. Eseguito il montaggio all'interno del rivelatore si esegue un riscaldamento con una spirulina con resistenza elettrica o con insufflaggio di aria calda, questo porta la colla a rifondere ed a far presa con il rivestimento interno dello straw tube.



Figura 31: Twister con spirulina a resistenza per il riscaldamento del twister all'interno dello straw.

4.3 Caratterizzazione meccanica degli straws

A fianco all'analisi strutturale del supporto e dell'interfaccia italiana e statunitense, il lavoro ha sviluppato anche una caratterizzazione meccanica della sensoristica posta su tale supporto. In particolare si sono effettuate delle prove di creep su 4 straw tubes, l'analisi eseguita è stata il proseguo di un precedente lavoro, in cui si sono caratterizzati meccanicamente questi sensori nel medio periodo (35 giorni). Lo studio svolto invece ha continuato il monitoraggio degli campioni fino ad un tempo di 430 giorni, a cui è seguita una fase di scarico e ricarica degli stessi provini. Si sono valutati gli allungamenti nelle fasi di carico e i recuperi durante la fase di scarico subito dagli straws posti sotto osservazione. Per la rilevazione è stato utilizzato un catedometro ottico.

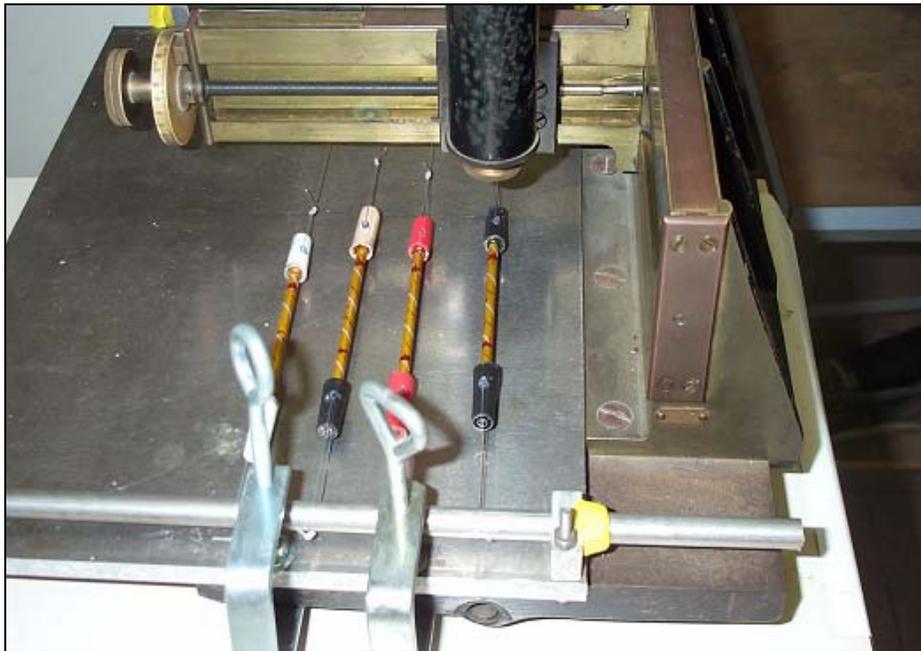


Figura 32: Comparatore ottico, gli straws sono stati posti sotto osservazione per un tempo di 400 giorni.

Le analisi sono state eseguite in condizioni di umidità al 48÷60% e temperatura 15÷25 °C ed hanno fornito i risultati riportati in figura 34. I 4 straws sono serrati da morsetti alle due estremità, ad una delle due è applicato un carico differente. Nel caso in esame le masse erano di 0.1 kg, 0.3 kg, 0.5 kg, 1 kg.

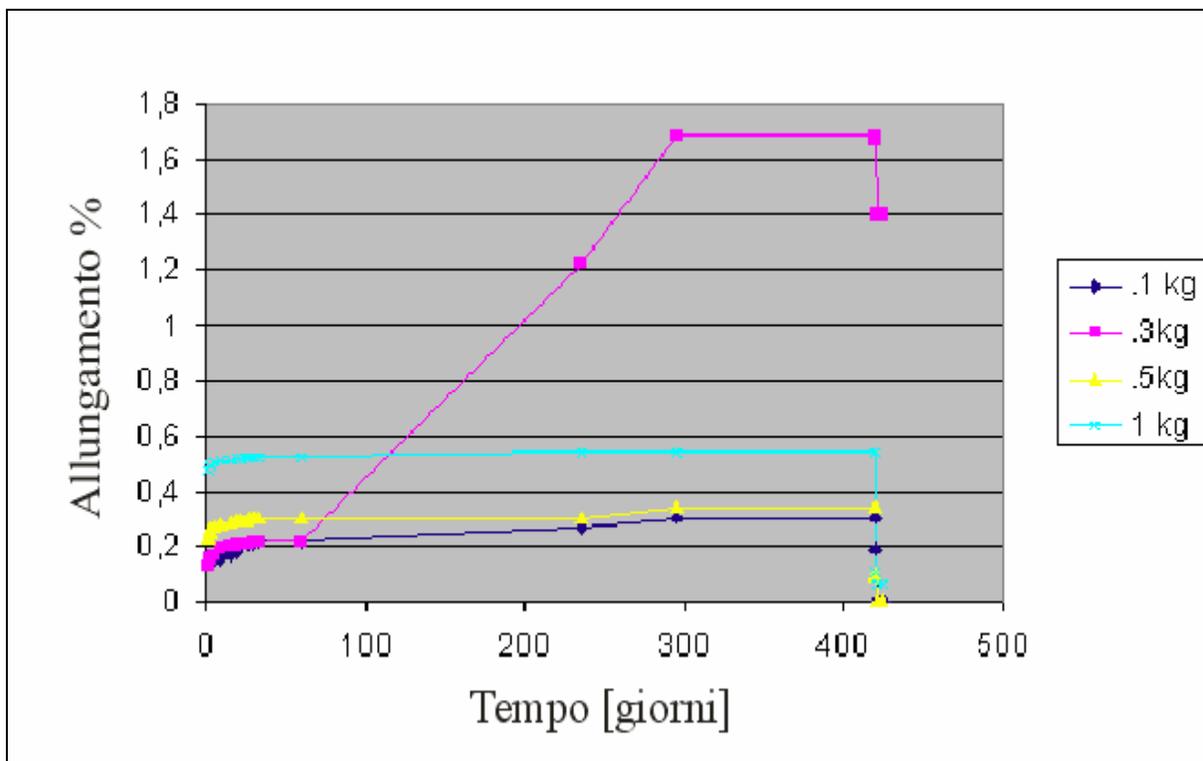


Figura 33: Grafico dell'andamento del fenomeno di creep in funzione del tempo per i 4 straws esaminati per 430 giorni, da notare il comportamento anomalo dello straw caricato con 300 g.

Come è possibile notare dall'andamento delle curve relative ai carichi applicato di 0.1 kg, 0.5 kg ed 1 kg si ha un comportamento asintotico della deformazione. Differente la risposta dello straw a cui si sono applicati 0.3 kg, in questo caso, dopo circa 70 giorni si assiste ad un brusco aumento della deformazione fino al raggiungimento di un plateau al 300 giorno, da questo momento in poi anche il comportamento di questo campione sembra stabilizzarsi su valori asintotici. Il

motivo di questa risposta anomala sembra spiegarsi con il verificarsi di un riassetamento meccanico dovuto all'adesivo impiegato, probabilmente da attribuirsi a qualche difetto in fase di incollaggio.

Importante da osservare è anche la fase di scarico dopo i 430 giorni di carico, anche in questo caso i due straws caricati con 0.1; 0.5 kg recuperano totalmente la deformazione subita, lo straw con 1 kg conserva una deformazione plastica di entità inferiore allo 0.1 %. Diverso il comportamento dello straw con carico applicato 0.3 kg, in questo caso la deformazione recuperata è solo una minima parte di quella complessivamente subita dallo straws, dopo lo scarico si ha un residuo permanente di deformazione dell'1.4%. Questo comportamento sembra essere una riprova di quanto osservato a proposito del comportamento anomalo di questo straws, la presenza di un riassetamento potrebbe giustificare il mancato recupero.

Alla fase di scarico dopo i 430 giorni è seguita una nuova applicazione di carico sugli stessi campioni di straws.. Si sono nuovamente sottoposti i 4 straws a carichi di 100 g, 300 g, 500 g e 1000 g con tempo di applicazione di 30 giorni²⁸, si è poi valutato il recupero a 24 ore dopo lo scarico. I dati ottenuti, riassunti in tabelle 13 e 14, sono stati rielaborati nel grafico di figura 35. Dall'analisi dei risultati si evince come tutti e 4 gli straws sembrano avere comportamento asintotico. Questa risposta per i campioni caricati con 0.1; 0.5; 1 kg non sorprende, è in perfetto accordo con quanto rilevato dalla precedente osservazione. Importante da sottolineare è invece il comportamento dello straw caricato con 0.3 kg si discosta dalla risposta data nel test dei 430 giorni, in questo caso non sembrano esserci nuovi cedimenti dell'adesivo e il campione si comporta in modo conforme agli altri provini. La misura della lunghezza degli straws dopo 24 ore dallo scarico conferma quanto osservato nell'analisi: tutti e 4 i provini si comportano nello stesso modo

²⁸ Condizioni di umidità al 48÷60% e temperatura 15÷25 °C.

recuperando totalmente, come nel caso dello straw caricato con 300 g, o quasi totalmente, come avviene per gli altri provini, la deformazione subita. C'è inoltre da sottolineare anche come il comportamento di questi provini è più rigido rispetto a quello riscontrato nella prima analisi.

Carico di tensionamento [g]	100	300	500	1000
Lunghezza Iniziale [mm]	53.380	53.850	53.230	53.310
Dopo l'applicazione del carico [mm]	53.400	53.880	53.280	53.460
Dopo 24 h [mm]	53.410	53.920	53.320	53.490
Dopo 8 giorni [mm]	53.410	53.920	53.330	53.500
Dopo 22 giorni [mm]	53.420	53.930	53.330	53.510
Dopo 30 giorni [mm]	53.420	53.930	53.330	53.510
Dopo 24 h dallo scarico [mm]	53.400	53.850	53.270	53.320

Tabella 13: Deformazione subita dai 4 straws in seguito all'applicazione dei carichi.

Carico di tensionamento [g]	100	300	500	1000
Allungamento dopo applicazione del carico (%)	0.037	0.056	0.093	0.281
Allungamento dopo 24 h (%)	0.056	0.130	0.169	0.338
Allungamento dopo 8 giorni (%)	0.056	0.130	0.188	0.356
Allungamento dopo 22 giorni (%)	0.075	0.148	0.188	0.375
Allungamento dopo 30 giorni (%)	0.075	0.148	0.188	0.375
Allungamento a 24 h dallo scarico (%)	0.037	0	0.075	0.019

Tabella 14: Allungamenti percentuali per i provini di straws di tabella 13.

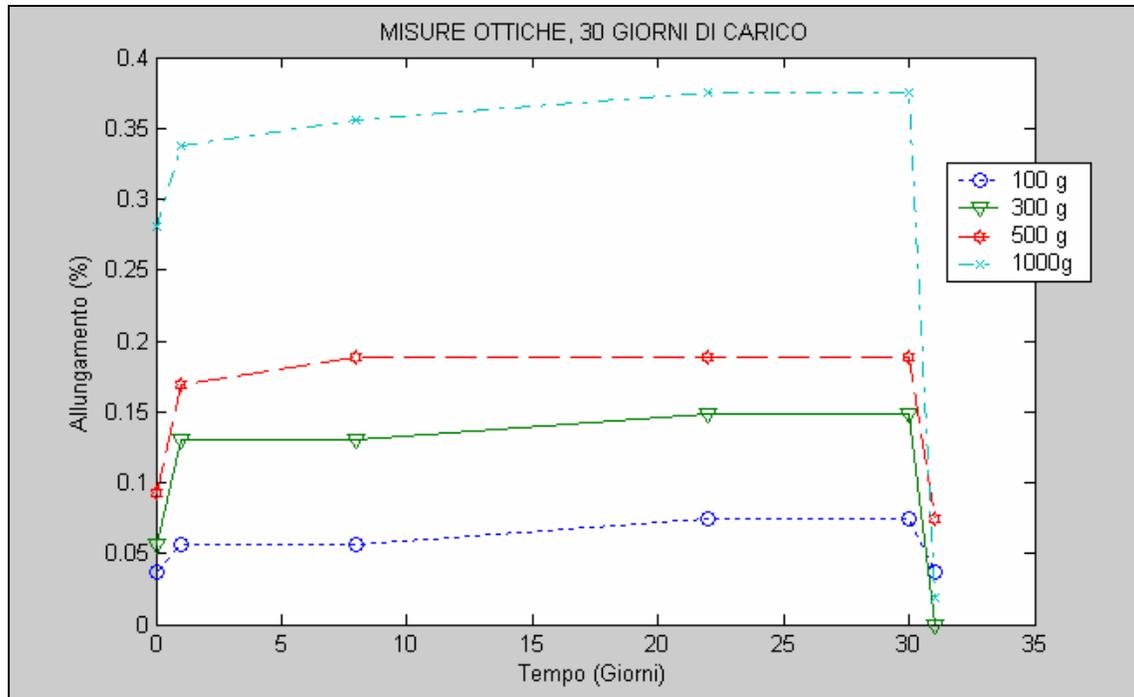


Figura 34: Grafico degli allungamenti in percentuale subiti dagli straws con carichi di 0.1; 0.3; 0.5; 1 kg. I valori si riferiscono ai dati riportati in tabella 14.

PARTE TERZA

Capitolo 5

ANALISI DELLE ALTERNATIVE AL SUPPORTO PER STRAWS E FASI DI ASSEMBLAGGIO DELL'INTERFACCIA

Lo studio dell'interfaccia nasce dalla necessità di creare un'alternativa a quella che è la soluzione americana di seguito descritta. Affinché si possa parlare di soluzione valida per rimpiazzare il supporto per straws concepito dagli statunitensi è necessario che il componente realizzato abbia la stessa trasparenza alle radiazioni della soluzione americana ma sia più rigido nella direzione di applicazione del carico. Gli studi realizzati in tal senso hanno quindi mirato ad eseguire dei confronti tra gli spostamenti subiti a parità di carico della soluzione americana e dell'interfaccia italiana. Una parte del lavoro di tesi prevede quindi la descrizione della soluzione americana ed alcune possibili alternative presentate dalla collaborazione italiana, in questa sede si è cercato di mettere in risalto aspetti positivi e negativi delle varie interfacce.

5.1 Soluzione americana

Il supporto per straws americano ha una sezione come quella riportata in figura 36, in tale soluzione sono stati impiegati materiali compositi, in particolare si è realizzato un angle-ply mettendo insieme sette pelli unidirezionali realizzate con matrice epossidica e fibre lunghe di carbonio, e del rohacell IG in due zone per conferire una certa rigidità alla struttura. La lunghezza è tale da ancorare la struttura tra i due estremi opposti del frame, sarà quindi sempre in aumento passando dalla prima all'ultima stazione.

L'inserimento degli straws su questa struttura è previsto tramite tensionamento degli stessi alle opposte estremità del supporto. La sequenza di montaggio prevede lo sviluppo delle seguenti parti:

- Realizzazione del supporto per straws in composito mediante sacco a vuoto.
- Lavorazione delle parti in rohacell.

- Assemblaggio del foam lavorato con il supporto già curato e successivo incollaggio delle parti.
- Realizzazione di un pacchetto di straws con 45 unità disposte su tre file da 15 sfalsate tra loro di 2 mm, pari alla lunghezza del raggio del rivelatore.
- Tensionamento del pacchetto di straw tubes su banco con applicazione di una tensione di 200 g.
- Inserimento ed incollaggio degli end-plates alle due estremità²⁹ degli straws.
- Inserimento di twisters all'interno degli straws.
- Inserimento del filamento di tungsteno da una delle due estremità dello straw.
- Montaggio degli end-plugs ed applicazione di colla conduttiva per il tensionamento del filamento.
- Inserimento della struttura così realizzata nel supporto.
- Montaggio del componente completo nella stazione di BTeV.

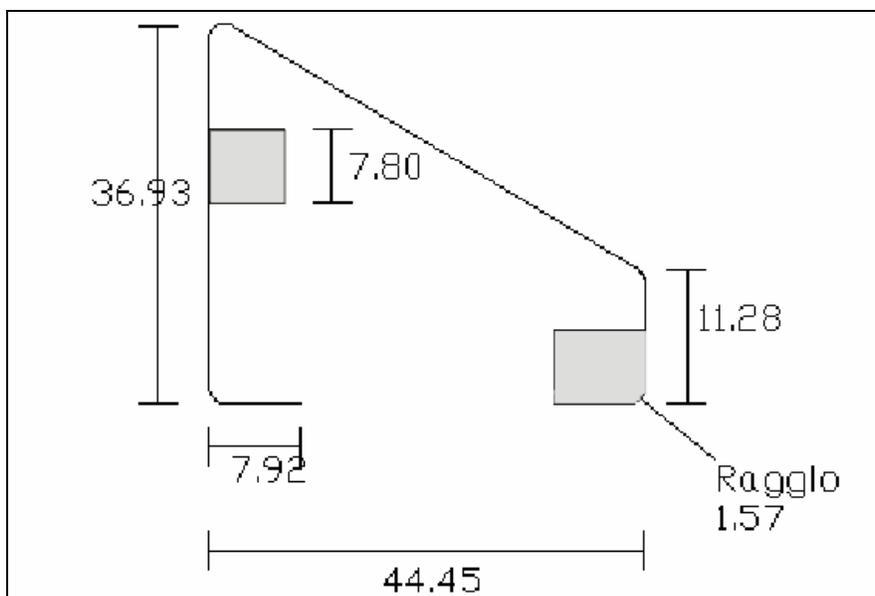


Figura 35: Sezione della soluzione americana, lo spessore delle pelli di carbonio è di 0.5 mm.

²⁹ Per una descrizione più accurata di questi componenti si guardi il capitolo 4.

Per il corretto tensionamento del pacchetto degli straws, alle due estremità, è prevista l'applicazione di un carico di 9 kg. Problemi che possono verificarsi in una soluzione di questo tipo sono legati al verificarsi di un possibile rilascio di tensione nel tempo con conseguente rilassamento della struttura; per avere una posizione precisa del punto in cui sono passate le particelle è necessario prevedere un sistema informatico in grado di valutare l'entità dello scostamento dalla verticale per ogni singolo straw e sommarlo algebricamente al valore della posizione delle particelle rilevato.

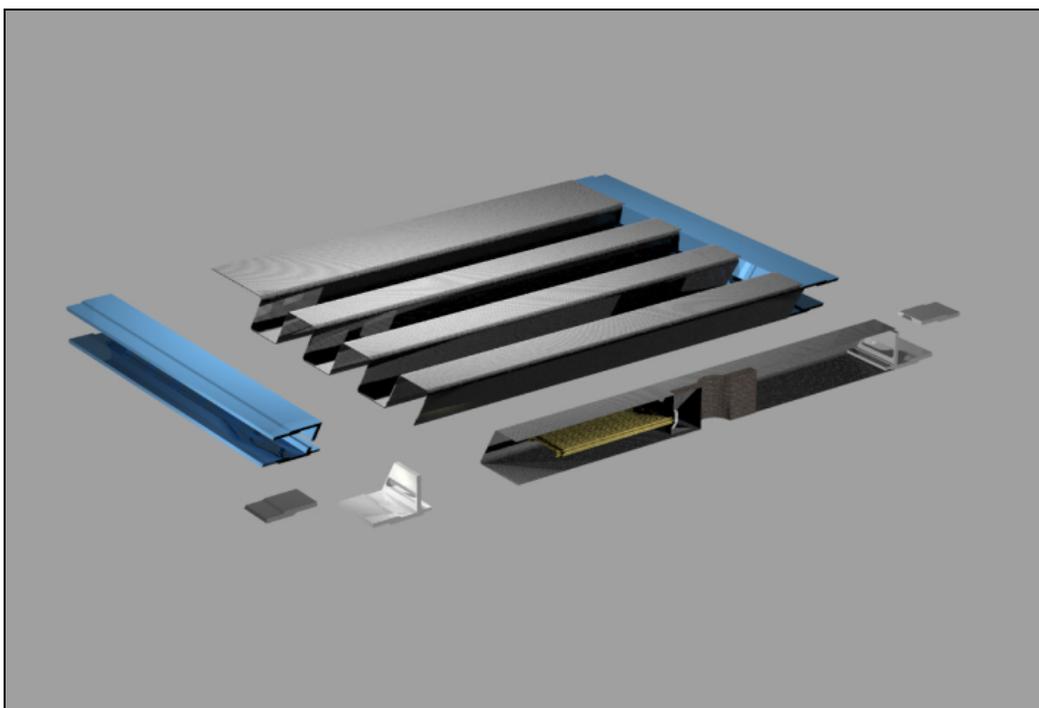


Figura 36: Supporto esterno con soluzione americana con forma a “C”, gli straws sono interni alla sezione e sono tensionati alle estremità.

L'inserimento sulla struttura esterna prevede la necessità di realizzare delle parti del supporto per straws in grado di incastrarsi con il frame. Come è possibile vedere in figura 37, si è pensato di realizzare queste parti in lega di alluminio, anticorrosivo; esse dovrebbero essere incollate alle due estremità del supporto a cura avvenuta.

5.2 Possibili alternative studiate in Italia

5.2.1 Soluzione con sezione a "Z"

In questa alternativa gli straws sono alloggiati all'interno della struttura in modo simile a quanto visto con la soluzione americana, anche le fasi di montaggio sono simili a quelle viste in precedenza; in accordo con le esigenze costruttive dell'esperimento è consentito l'ancoraggio dell'interfaccia nel supporto mediante l'impiego di inserti metallici da incollare alle due estremità. La sezione di base è riportata in figura 38, come per la soluzione americana, anche in questa è necessario tensionare gli straws alle due estremità.

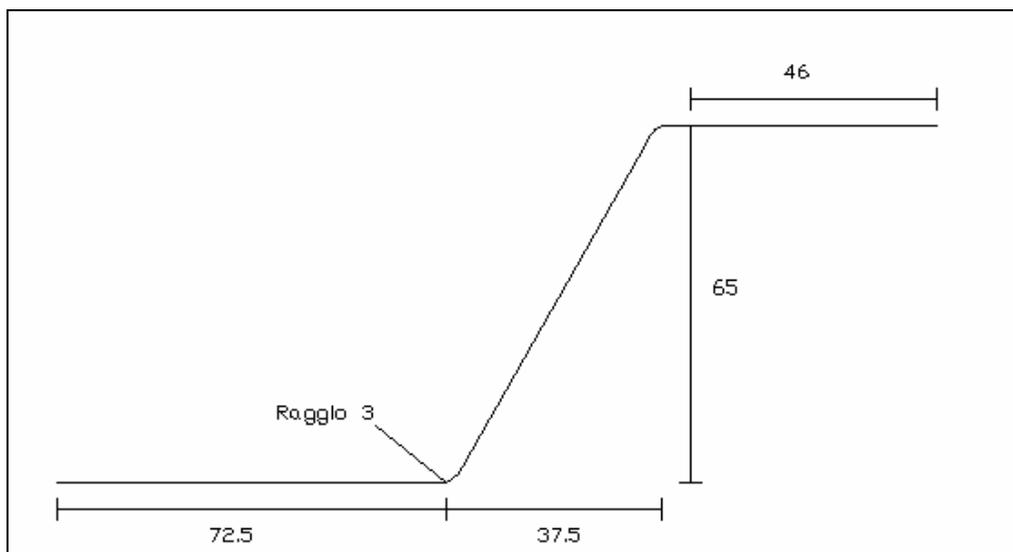


Figura 37: Sezione di base di una delle interfacce italiane presentate. Le quote in figura sono tutte in mm.

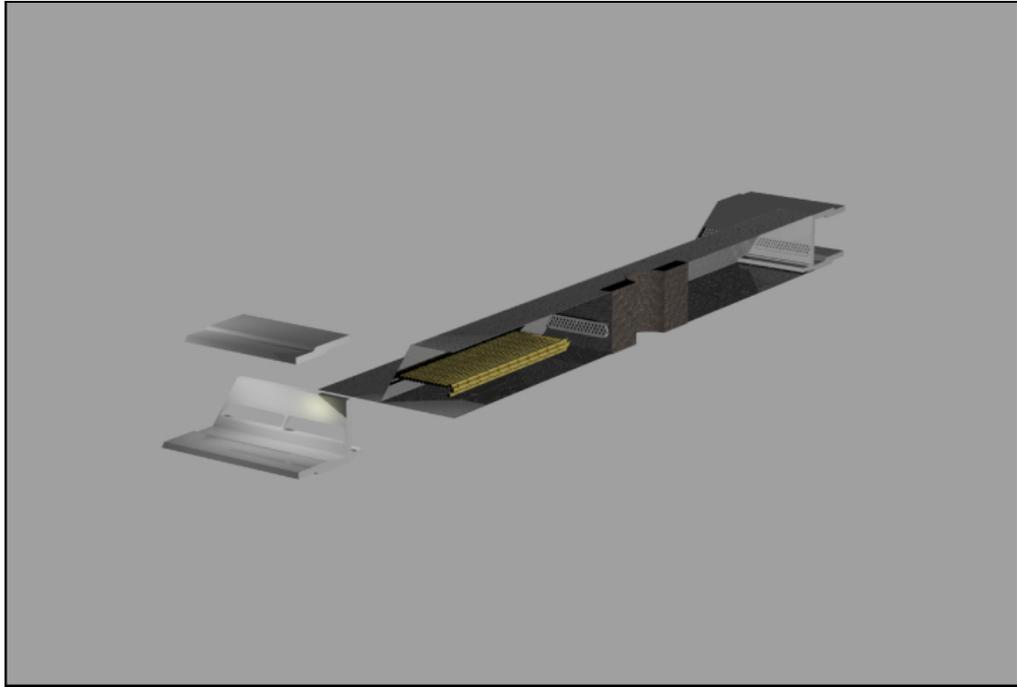


Figura 38: Soluzione con sezione a “Z”, si noti come la forma della base permette l’alloggiamento degli straws senza invadere la restante parte del frame, anch’essa con straw tubes.

La forma asimmetrica della sezione consente di avere un minore abbassamento della struttura rispetto al modello presentato dagli Statunitensi, tuttavia, dal punto di vista costruttivo non presenta innovazioni vere, anche in questo caso è infatti prevedibile un rilassamento degli straws nel corso del tempo dovuto al rilascio di tensione.

5.5.2 Soluzione con sezione a “Z” con sandwich ad una sola estremità

Una seconda alternativa presentata, poi non sviluppata in quanto non in grado di risolvere il problema del tensionamento degli straw tubes alle estremità, prevede l’introduzione di un sandwich su una delle due estremità, come riferimento si guardi la figura 40. Una soluzione di questo tipo avrebbe permesso di avere una maggior rigidezza con un modesto aumento di massa attraversata. Secondo lo schema di realizzazione si sarebbe dovuto dimezzare lo spessore delle pelli di

composito nella zona del sandwich per permettere l'inserimento del foam senza avere un conseguente aumento della massa attraversata. Si è inoltre verificato come l'introduzione del Rohacell IG con densità 32 kg/m^3 non comporta molta riduzione della lunghezza di radiazione ma migliora notevolmente la rigidezza della struttura. L'inserimento di questa struttura composita è previsto sul segmento di lunghezza 72.5 cm di figura 38, il vantaggio in termini di aumento di rigidezza sarebbe infatti maggiore di quello che si avrebbe ponendo il sandwich sul lato di 46 cm .

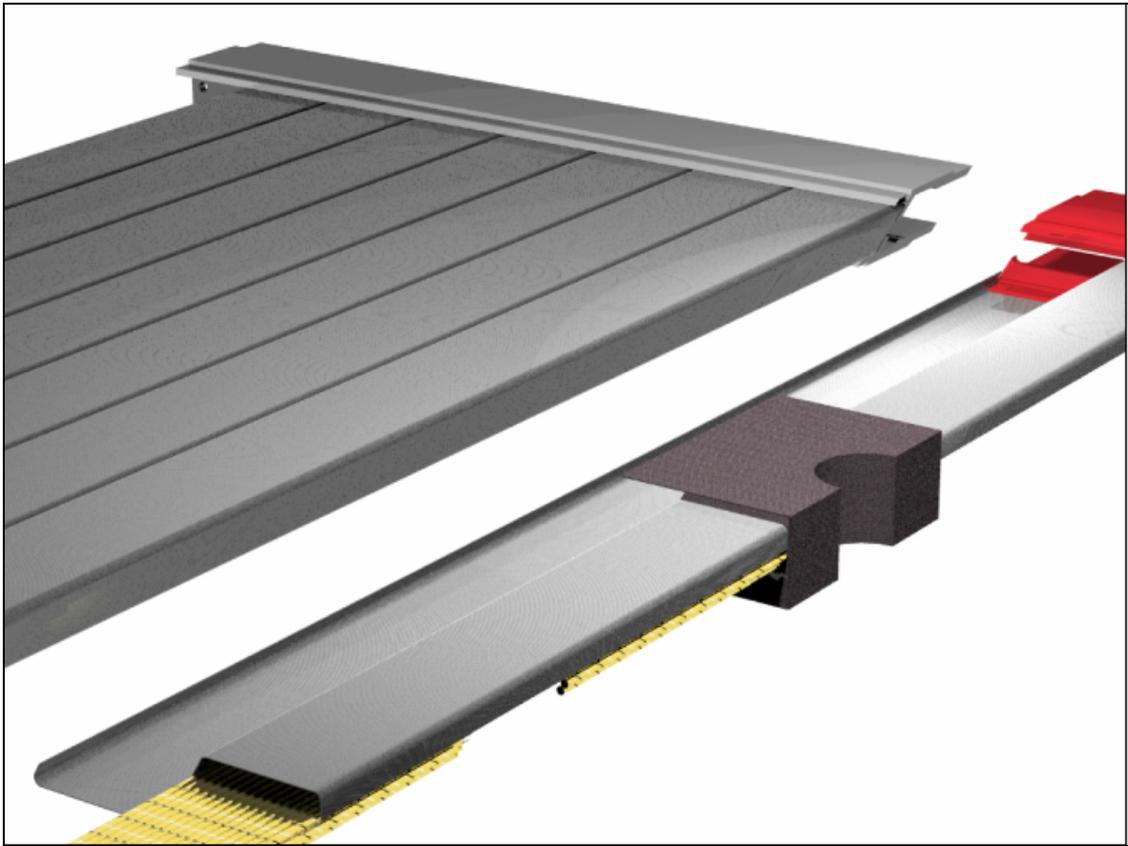


Figura 39: Soluzione con sezione a forma di “Z” con una delle due estremità per avere un aumento di rigidezza, in questa alternativa non può evitarsi il tensionamento degli straws alle estremità.

5.2.3 Soluzione a "Z" con due sandwich, uno per ogni estremità

Una seconda modifica, si veda figura 41, prevede la possibilità di introdurre dell'espanso anche sull'altro lato del supporto. Una sezione con due parti in struttura composita permetterebbe infatti di avere un aumento di rigidità ancor superiore rispetto a quello ottenibile con un solo sandwich, lo spessore delle pelli sulle parti a contatto con il rohacell sarebbe dimezzato di conseguenza la massa attraversata rimarrebbe pressoché invariata. Le fasi di montaggio di questa struttura sarebbero state simili a quelle della soluzione americana.

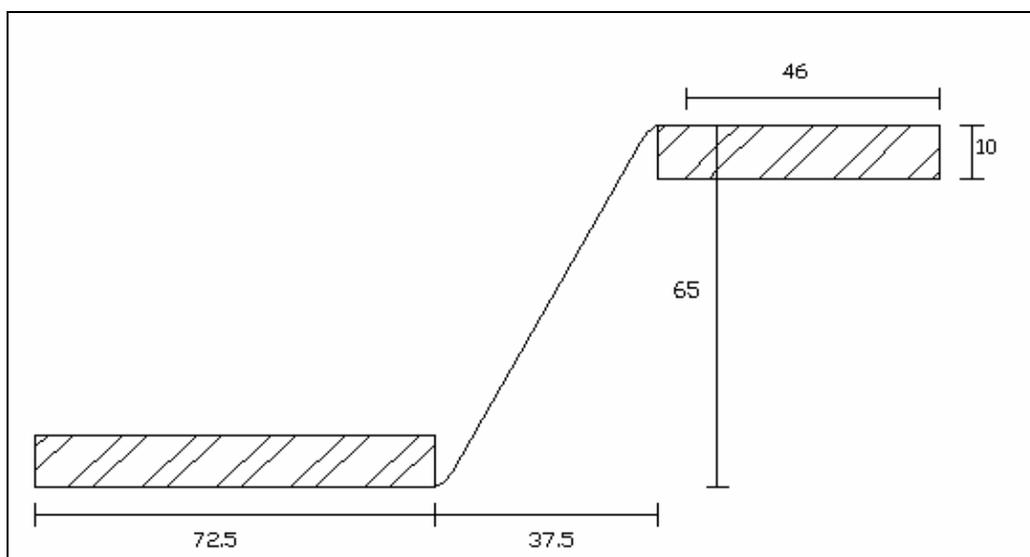


Figura 40: Soluzione con due foam su ambo i lati della "Z". Non essendo stata più sviluppata, gli spessori dei sandwich sono puramente indicativi, lo spessore delle pelli di composito è di 0.25 mm nelle zone a contatto con il foam e 0.5 dalle altre parti.

Una ulteriore modifica alla soluzione presentata potrebbe essere quella di introdurre dei sandwich anche sulle parti a gomito della sezione, il riferimento è a figura 42, in questo modo la rigidità complessiva sarebbe ulteriormente aumentata, allo stesso tempo non si pregiudicherebbe il montaggio degli straw che sarebbero posizionati nell'unico tratto in cui non ci sarebbe il foam. Lo

spessore del composito, in accordo con quanto detto in precedenza sarebbe dimezzato nelle zone in cui è posto il foam in modo da permettere la realizzazione di entrambe le pelli del sandwich tenendo immutata la massa attraversata.

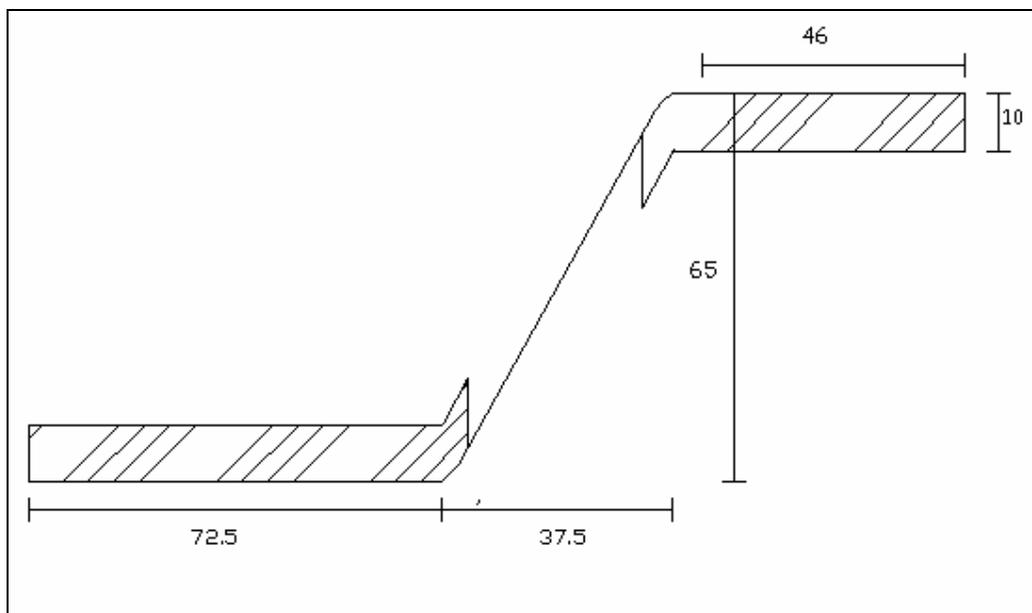


Figura 41: Variante sulla soluzione precedente. In questo caso il foam risulta essere stato esteso sulla parte della “Z” fino al punto in cui iniziano gli straws per conferire ancora un aumento della rigidità.

5.2.4 Soluzione italiana, forma a “C” con due sandwiches

Sempre al fine di avere un aumento di rigidità della struttura senza variazione della massa attraversata, si è pensato di sfruttare la maggior inerzia del sandwich rispetto al semplice angle-ply usato nella soluzione americana. Anche in questo caso è necessario sottolineare che gli spessori delle pelli di composito sono divisi in due strati di spessore dimezzato nelle zone a contatto con il foam, in questo modo non si aumenta di molto la massa attraversata, la variazione è dovuta alla sola

presenza del core.

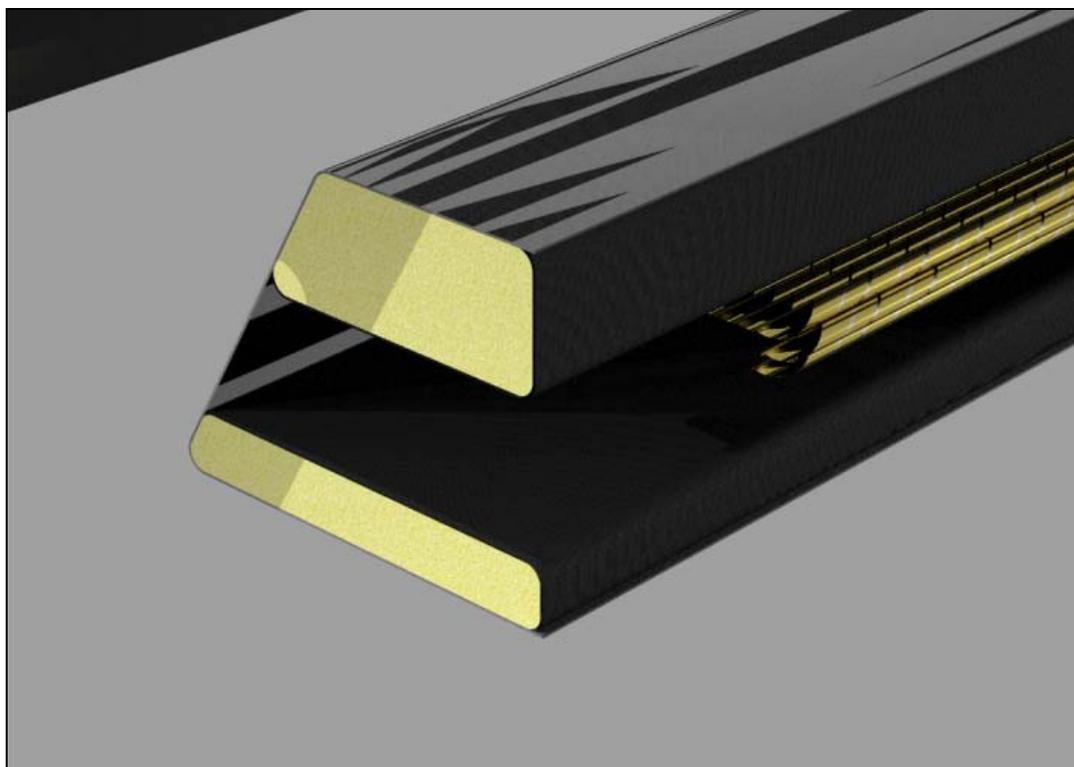


Figura 42: Ulteriore possibile alternativa alla soluzione americana, il dettaglio mostra l'introduzione di due sandwich invece delle normali pelli di solo composito. La struttura nel complesso dovrebbe essere più rigida.

5.2.5 Soluzione italiana chiusa, sandwich con straws inglobati

Questa soluzione presentata, poi ritenuta essere la migliore tra le possibili alternative al supporto americano, non è solo in grado di aumentare la rigidità della struttura di supporto ma anche di risolvere in maniera innovativa il problema del posizionamento degli straw tubes. La parte che differenzia questa soluzione dalle precedenti varianti è legata al realizzare la parte interna del rohacell costituente l'espanso con uno solco in grado di alloggiare l'intero pacchetto di rivelatori, in questo modo si evita di tensionare la struttura esterna in kapton degli straws, è solo necessario

tensionare il filamento di tungsteno per tenerlo in posizione. Un ulteriore vantaggio di realizzare un alloggiamento, seppure in materiale espanso, in cui collocare gli straws, è costituito dal avere un posizionamento di questi rivelatori immutabile nel tempo. Si ridurrebbero in questo modo gli errori legati ad una ricostruzione al computer della posizione degli straws dal momento che si elimina il rilascio di tensione nel tempo già accennato in precedenza. Un altro vantaggio di questo tipo di struttura è la riduzione di tutti i meccanismi legati al tensionamento degli straws da alloggiare nelle parti terminali aumentando in questo modo lo spazio occupabile dall'elettronica dei rivelatori posta in quella zona.

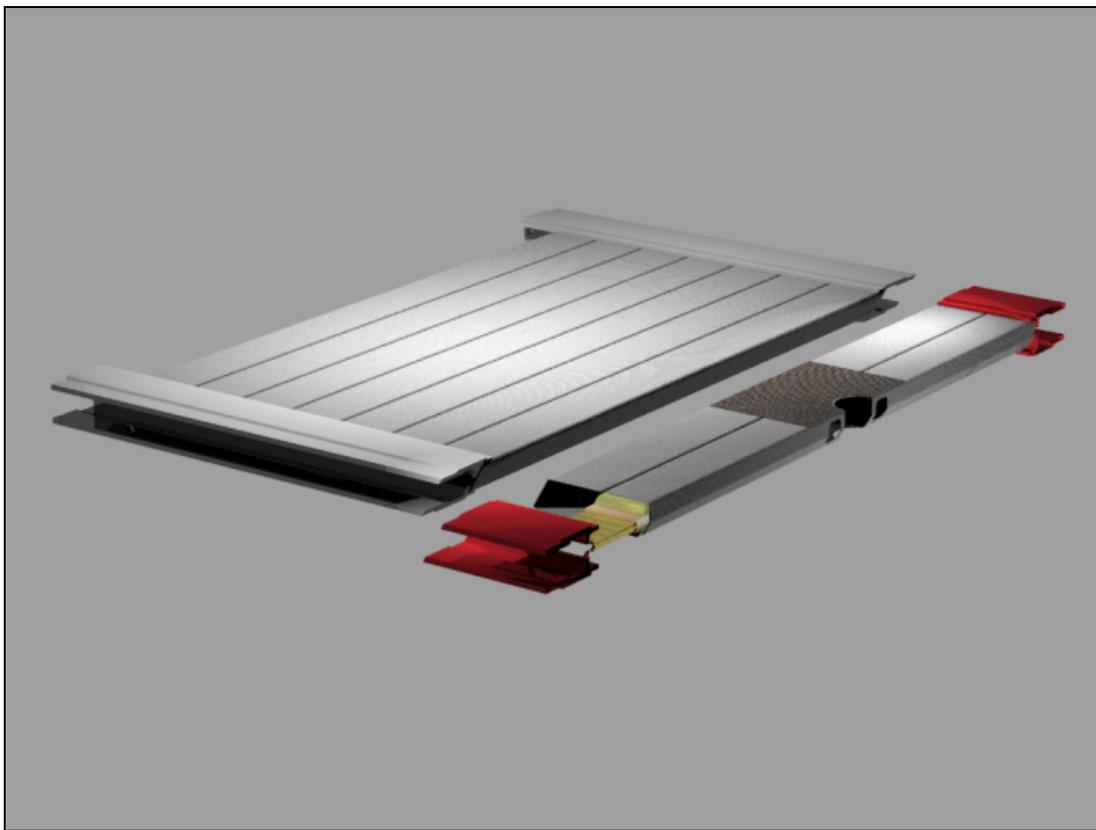


Figura 43: Soluzione con sandwich scatolato contenente il pacchetto di straws, in questo caso non si ha il problema del tensionamento della sensoristica, si riducono pertanto gli ingombri alle estremità.

5.3 Descrizione delle fasi di montaggio dell'interfaccia per straws

Di seguito è descritta la procedura da seguire per ottenere l'interfaccia chiusa, le operazioni condotte tendono a realizzare il sandwich scatolato cercando, durante le varie fasi del montaggio, di non deformare gli straws, si vuole soprattutto evitare di avere delle variazioni di eccentricità nella sezione dei sensori.

- Realizzazione dello strut.
- Lavorazione del rohacell.
- Assemblaggio della componentistica realizzata con l'inserimento degli straws nella struttura.
- Operazioni di finitura.

5.3.1 Realizzazione dello strut

La lavorazione per la realizzazione dello strut in materiale composito, pre-preg unidirezionale con matrice epossidica e rinforzo in fibra di carbonio ad alta resistenza, prevede la preliminare lavorazione dello stampo in anticorodal. La sezione dello stampo è riportata in figura 45, la presenza di parti scomponibili e di spinotti per il loro montaggio e corretto posizionamento sulla struttura è necessaria per permettere alle due parti, in cui lo strut di composito è diviso, di potersi assemblare dopo l'inserimento degli straws.

La lavorazione dello stampo in anticorodal avviene con fresa partendo da due blocchi di dimensioni 53x200x100 cm e 20x100x100 cm, La velocità di lavorazione della macchina è di 1m/min con velocità di rotazione di 3000 g/min, per evitare delle deformazioni del pezzo è necessario effettuare dei trattamenti di distensione durante la lavorazione, interrompendo di volta in

volta la fresatura. Come si nota da figura 45, la necessità di avere gli angoli raccordati deriva dal permettere l'estrazione del componente una volta curato. Da sottolineare è anche la presenza di due lamine di spessore di 3 mm poste sulla parte superiore del stampo e calettate ad essa tramite viti, la loro rimozione permette l'inserimento di resistenze per il riscaldamento della colla impiegata per far aderire le due parti dello strut.

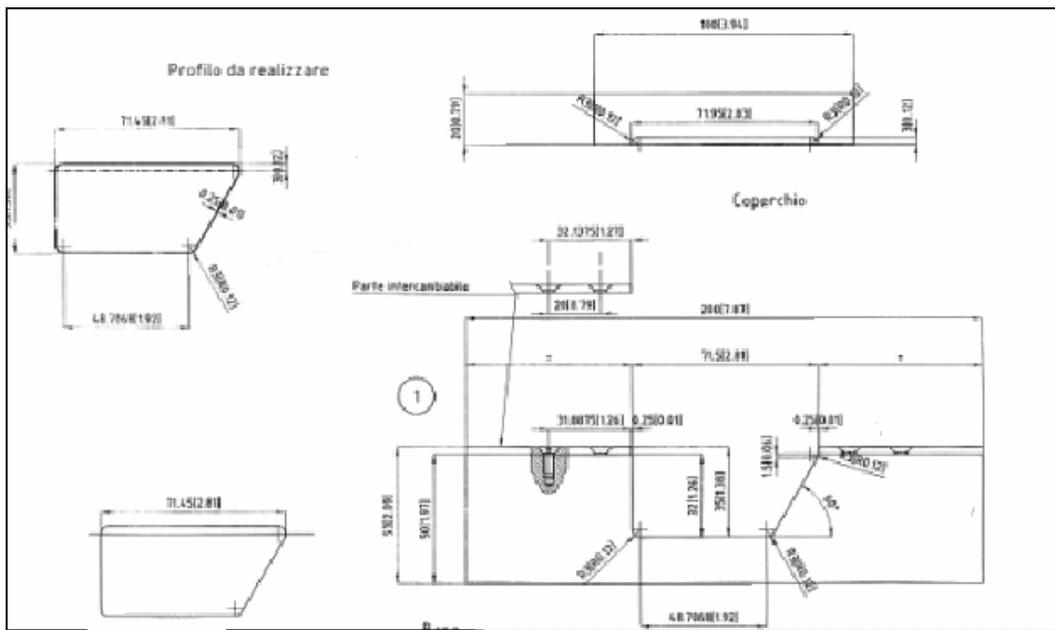


Figura 44: Sezione AutoCad dello stampo con le opportune quote.

Alla realizzazione delle due parti dello stampo, segue la preparazione dell'angle-ply che andrà a costituire la pelle del sandwich. In questa fase si dispone un primo pre-preg, di spessore 0.125 mm sullo stampo, segue l'inserimento di fibre ottiche lungo l'asse dello stampo. La necessità di avere questi sensori di posizione all'interno della struttura composita deriva dal voler testare questo prototipo per realizzare un modello agli elementi finiti tarato con l'interfaccia. Posizionate le fibre ottiche si passa al posizionamento del secondo pre-preg, segue una fase di aspirazione

preliminare operata con sacco da vuoto per favorire l'eliminazione delle eventuali sacche d'aria all'interno della struttura.

C'è da sottolineare che le dimensioni del secondo pre-preg sono leggermente più piccole di quelle del sottostante, è infatti prevista la presenza di un bordo di spessore dimezzato, in quanto dato da un solo pre-preg, lungo la zona in cui bisogna effettuare l'incollaggio tra le due parti. Questo accorgimento permette di evitare la presenza di un sovrappessore fortemente localizzato e posto trasversalmente al fascio di particelle. La procedura descritta viene ripetuta per l'altra parte del sandwich, anche in questo caso tra le due pelli si deve posizionare il sensore a fibra ottica prima della seconda pelle. In questo secondo caso, è lo strato di pre-preg posto per ultimo ad avere una dimensione maggiore rispetto al precedente, si vuole infatti migliorare il contatto tra le due parti al momento dell'incollaggio.



Figura 45: End-plate e piastre di montaggio dell'interfaccia italiana. Le due piastre devono essere inserite nel supporto prima del processo di cura. La lunghezza delle flangie è di 20 mm.

Realizzate le due parti in composito si passa ad inserire il pezzo in anticorodal nelle due estremità dell'interfaccia è di lunghezza 20 mm. Come si può notare da figura 46, si sono praticati, nella zona in cui riandra a posizionare l'end-plate, quattro fori assiali, due lisci per permettere il montaggio degli end-plates e due filettati per andarsi ad ancorare sulle barre di posizionamento di cui si fa cenno più avanti. E' attualmente in studio la possibilità di realizzare la parte della flangetta da inserire all'interno dello strut con forma a cuneo. Si è verificato come risulti difficile lavorare con la fresa per la realizzazione di superfici tra loro non ortogonali. Se da un lato la realizzazione di uno svasso con angolo minore di 90° può permettere l'ottenimento di un pezzo con una struttura più compatta ed omogenea oltre a permettere un inserimento più agevole all'interno della struttura in composito, d'altro canto un angolo retto creerebbe meno difficoltà nella realizzazione dello stampo pur non pregiudicando di fatto la funzionalità del componente.

Su tali flangette si posizionano due pezzi di unidirezionale, di lunghezza 20 mm e spessore 0.125, questo pezzo di pre-preg serve per avere una migliore aderenza con la restante parte del sandwich. Dopo questa operazione si passa al posizionamento di due maschere di anticorodal, una in corrispondenza della flangia anteriore ed una su quella posteriore, tali componenti presentano quattro fori, due di tipo spina per permettere il calettamento sullo stampo e due filettati per agganciarsi alla flangetta corrispondente.

Si prepara il sacco con un telo di kevlar, si aspira il sacco e si mette il componente in autoclave alla temperatura di 80 °C per un tempo di 14÷18 ore. Eseguita la cura si preleva lo stampo dall'autoclave, si rimuove il sacco, si rimuovono le due maschere anteriori e posteriori e si montano i due supporti in acciaio da impiegare per il posizionamento degli straws. Dallo stampo,

ancora contenente lo strut, si rimuovono le due parti superiori con le relative spine di montaggio.

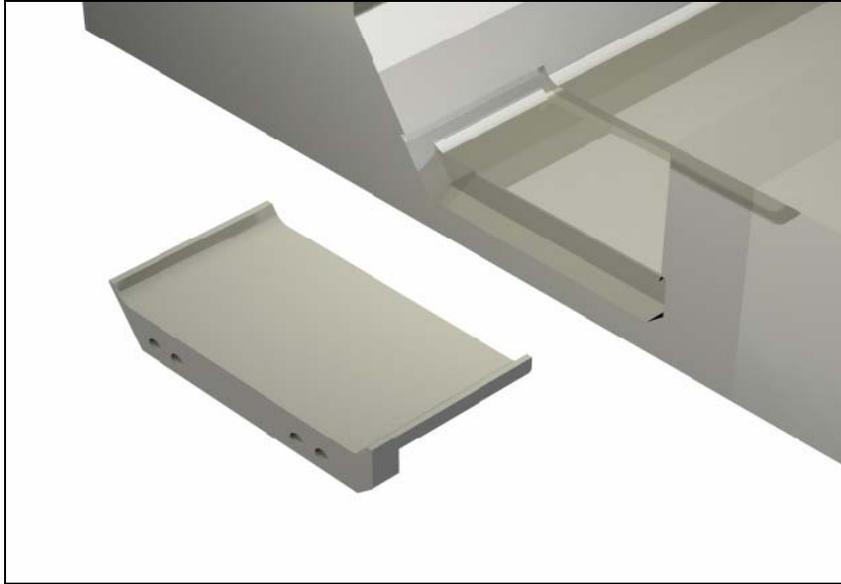


Figura 46: Particolare dello stampo con piastra per fissare l'end-plate, in questa immagine la parte da inserire nel composito presenta uno spigolo ad angolo retto, come sottolineato si sta valutando la possibilità di realizzare uno spigolo con angolo acuto per avere una maggiore facilità di inserimento nella struttura.

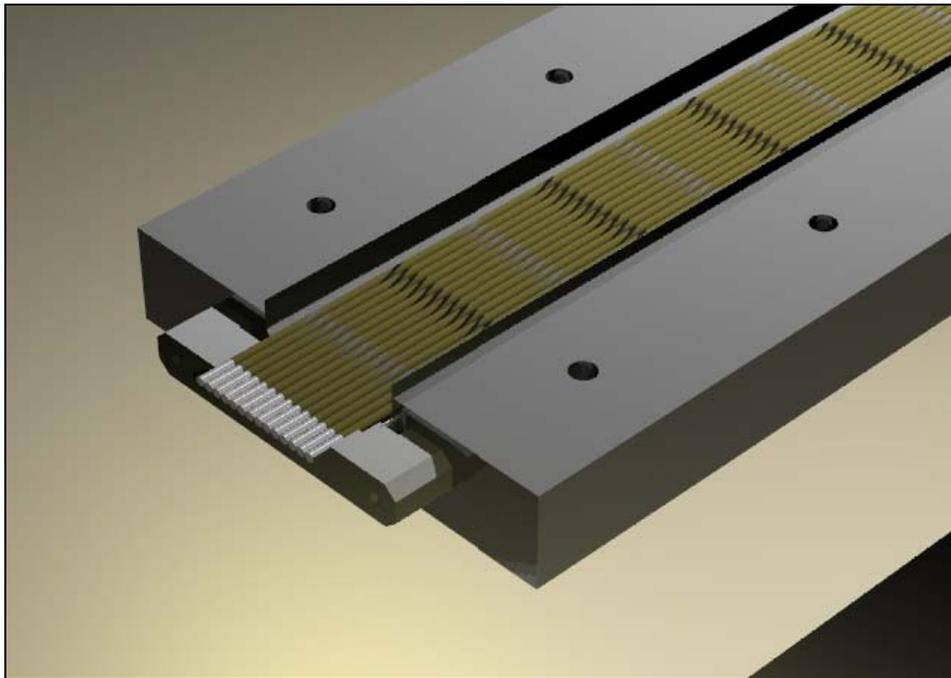


Figura 47: Posizionamento delle due maschere di Anticorodal nella parte anteriore e posteriore dello stampo per permettere di tenere in posizione gli inserti posti.

5.4 Lavorazione del rohacell

La realizzazione del core in rohacell ha richiesto l'esecuzione di 15 solchi a forma di semicilindro lungo tutta la sezione dell'espanso. Il raggio di questi solchi è di 3.2 mm, in essi devono andarsi ad incollare gli straws della prima e dell'ultima fila del pacchetto da 45.

La lavorazione di precisione di questo espanso ha richiesto diversi tentativi prima di arrivare ad un risultato accettabile. Scopo del foam è quello di tenere in posizione gli straws all'interno dell'interfaccia. Per la realizzazione degli solchi si è impiegata una fresa, non sono stati ritenuti validi precedenti lavorazioni in cui si è cercato con pressori di schiacciare opportunamente tale materiale, lo solco aveva un ritorno elastico a fine lavorazione che lo rende di fatto inutilizzabile. La lavorazione con fresa, inizialmente scartata in quanto ritenuta sporca data l'alta produzione di polveri, si è rivelata essere l'unica possibile. Prove sono state effettuate usando una fresatrice con velocità di rotazione inferiore ai 7000 giri/min. Effettuando una lavorazione con alto numero di giri ed alta velocità di avanzamento (6000 giri/min) si è bruciato il solco fatto sul provino. Prove successive effettuate a 3000 giri/min con velocità di avanzamento di 1 m/min hanno portato dei risultati migliori, in figura 49 sono state riportate alcune prove effettuate a differente numero di giri sullo stesso campione di rohacell.

Alla lavorazione si è fatta seguire una fase in di verifica dei risultati ottenuti. Si è verificata la rotondità, l'assialità e l'uniforme profondità delle scanalature effettuate. Si è pensato di adoperare un proiettore di profili per le prime due verifiche mentre per l'ultima analisi è sufficiente impiegare una barra rettificata e posarla su una scanalatura in modo da valutare l'uniforme sporgenza della stessa dal bordo.

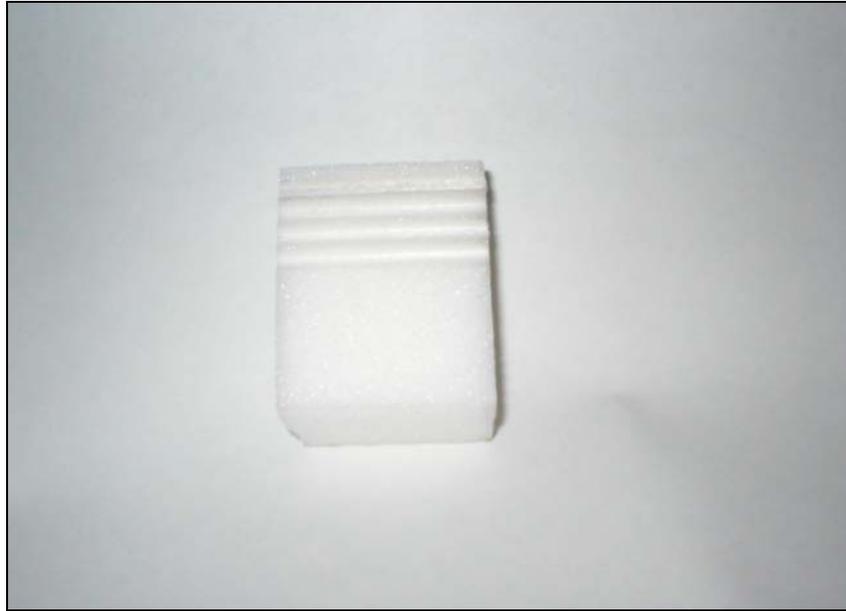


Figura 48: Campione di rohacell dopo la fresatura. Il foro in alto è stato bruciato per la velocità troppo alta della fresa, gli altri sono di migliore fattura.



Figura 49: Stesso campione di rohacell fotografato da un'altra angolazione, si noti lo solco a destra bruciato. Gli altri 3 sono venuti meglio in quanto si è ridotta la velocità di rotazione della fresa.



Figura 50: Fresa impiegata per la lavorazione del rohacell. E' realizzata in acciaio rettificato.

Le verifiche fatte al proiettore di profili hanno dato i risultati mostrati in figura 52 e 53, come si può notare da questa analisi i fori ottenuti con velocità di rotazione di 3000 giri/min presentano una buona sezione semicircolare per tutta la lunghezza. Questo tipo di lavorazione ha permesso di mantenere intatti anche i denti tra uno solco ed il suo contiguo come meglio si vede in figura 53.

Le eventuali imperfezioni presenti al proiettore di profili per il foro indicato con la freccia di figura 53 sono da attribuirsi ad un taglio del pezzo di scarsa precisione³⁰. Da sottolineare come la lavorazione con fresa è risultata essere anch'essa di notevole difficoltà per la natura del materiale da lavorare, essendo un espanso, infatti, tende a sfaldarsi durante la stessa fresatura.

³⁰ Trattandosi di un test eseguito su tre campioni di rohacell il taglio effettuato per sagomarli è stato praticato a mano servendosi di un taglierino.

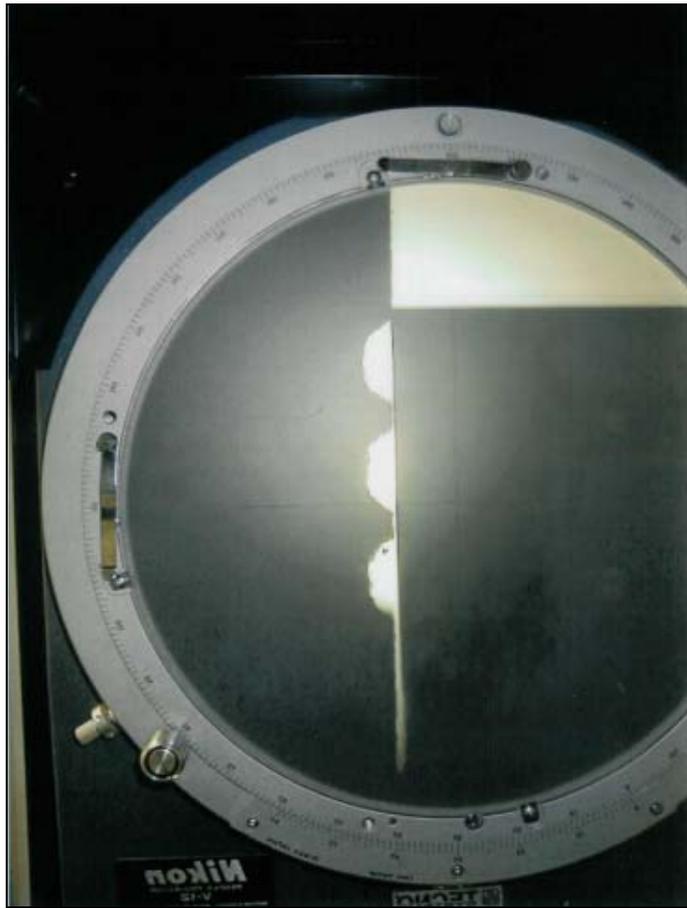


Figura 51: Immagine al proiettore di profili di un campione di rohacell dopo lavorazione di fresatura.

E' possibile verificare l'uniforme profondità applicando su ogni incavo una barra di acciaio rettificato e verificare che non ci siano sporgenze, l'eventuale presenza di sporgenze o rientranze è testimonianza di una parte fresata di meno delle altre. Per la verifica dell'assialità tra il pezzo di rohacell e il foro è invece necessario avere delle piastre di acciaio rettificato aventi larghezza pari alla distanza tra il parte esterna del pane e la prima scanalatura, allineando un lato di queste lastre con il bordo del pane è possibile controllare che non ci siano dei fori non allineati.

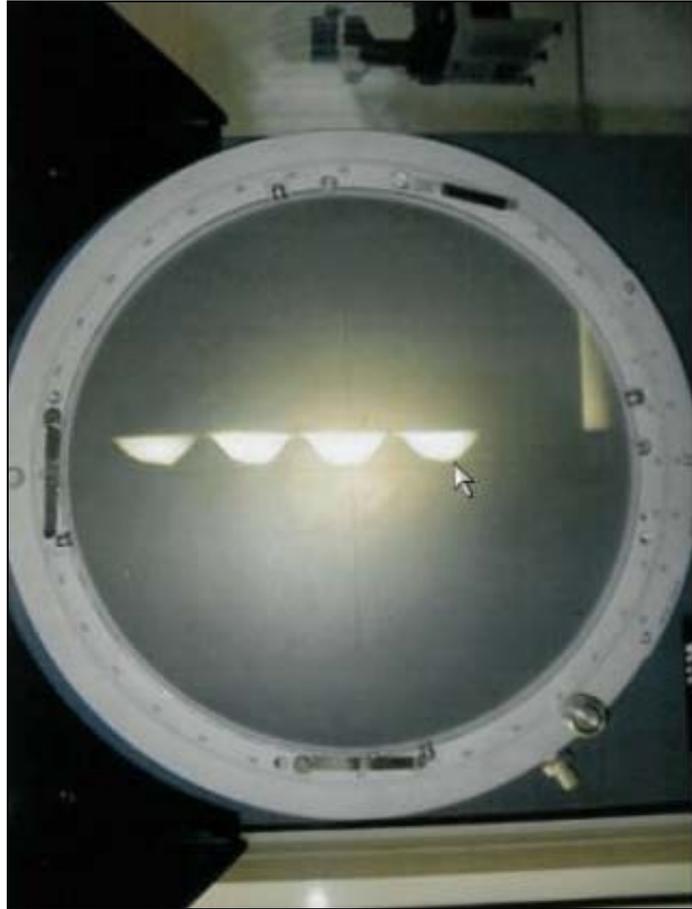


Figura 52: Analisi al proiettore di profili di un campione di rohacell, lo solco indicato dalla freccia è stato eseguito con velocità di rotazione della fresa di 3000 giri/min.

5.5 Assemblaggio della componentistica realizzata

Le fasi di lavoro sono:

- Incollaggio del rohacell all'interno nello strut
- Incollaggio degli straws all'interno del rohacell.
- Incollaggio delle due parti realizzate.
- Inserimento sull'interfaccia di end-plates ed end-plugs.

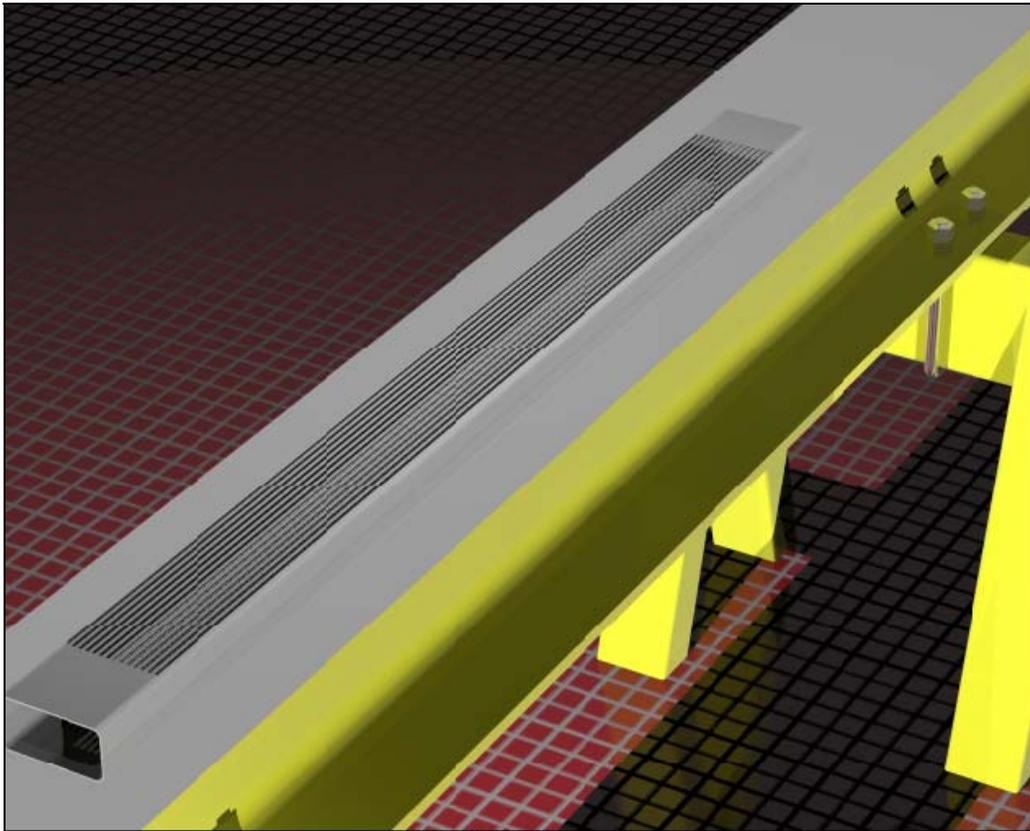


Figura 53: Composito realizzato con fibre lunghe unidirezionali in carbonio e matrice epossidica adagiato su banco di lavoro.

5.5.1 Incollaggio del rohacell all'interno nello strut

Alla realizzazione delle parti separate segue il loro assemblaggio, l'intera operazione è eseguita in camera pulita, il prototipo è posto su un supporto riportato in figura 55 realizzato con una trave di precisione N6 rettificata, verniciata³¹ e montata su due cavalletti.

L'incollaggio delle singole parti avviene con l'impiego di un adesivo a base di parylene avente le specifiche riportate nella sezione dei materiali utilizzati.

³¹ Per la verniciatura di questo componente si utilizza una resina epossidica applicata con aerografo, si parla di verniciatura industriale dal momento che prevede la spruzzatura della sola polvere senza la presenza del solvente. La colorazione è gialla 1023 secondo le scale RAL.

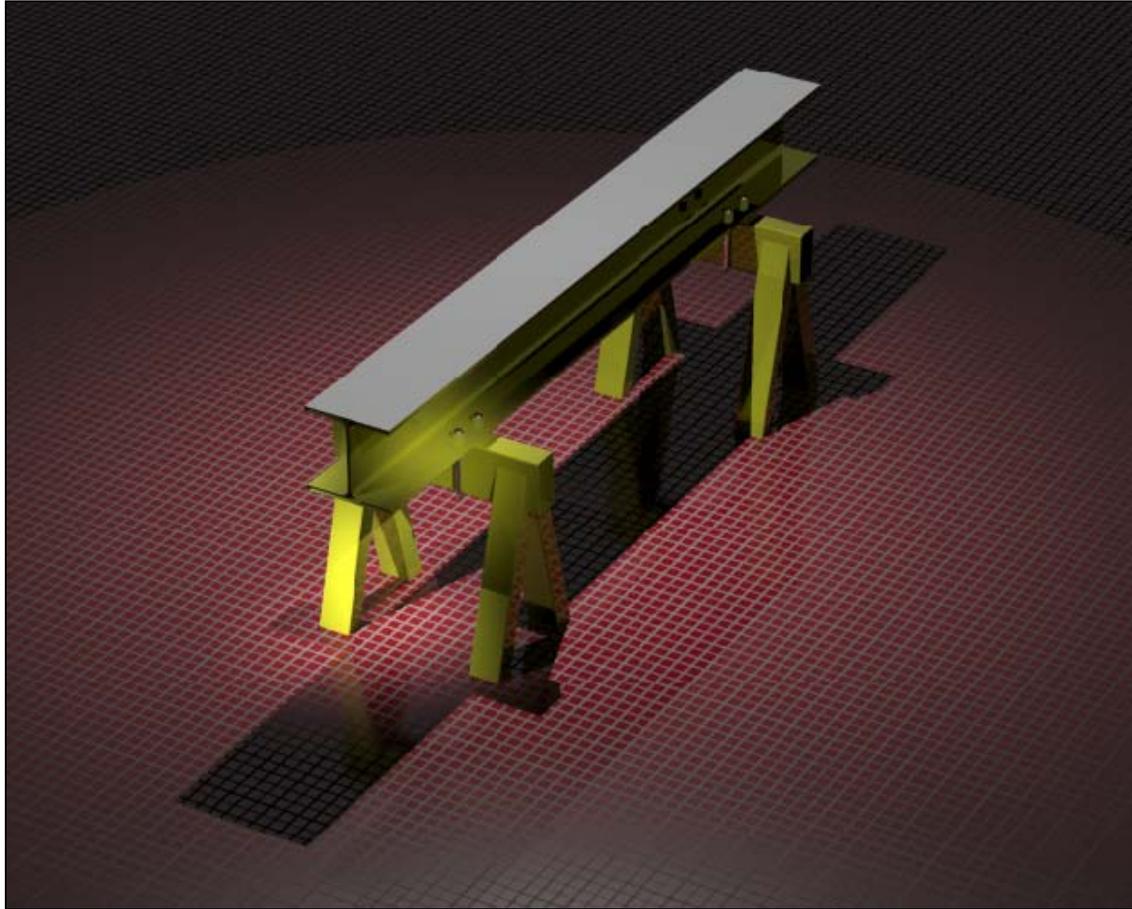


Figura 54: Trave giustificata con cavalletti da usarsi come banco di lavoro per la realizzazione dell'interfaccia.

La sequenza di incollaggio prevede di cospargere la parte interna dello strut con l'adesivo sopra descritto, è possibile ricorrere anche ad una spruzzatura con aerografo per assicurare una migliore uniformità di spessore in questo caso l'ugello di spruzzo deve essere tenuto a distanza di 20 cm dalla superficie da ricoprire. Per ridurre le masse introdotte è necessario depositare solo delle strisce di adesivo nello strut, lo spessore massimo impiegabile è di 30 μm , ulteriori aumenti porterebbero ad una quantità di massa attraversata molto alta, inficiando di fatto gli sforzi fatti per ridurla con il controllo delle dimensioni trasversali degli altri componenti.

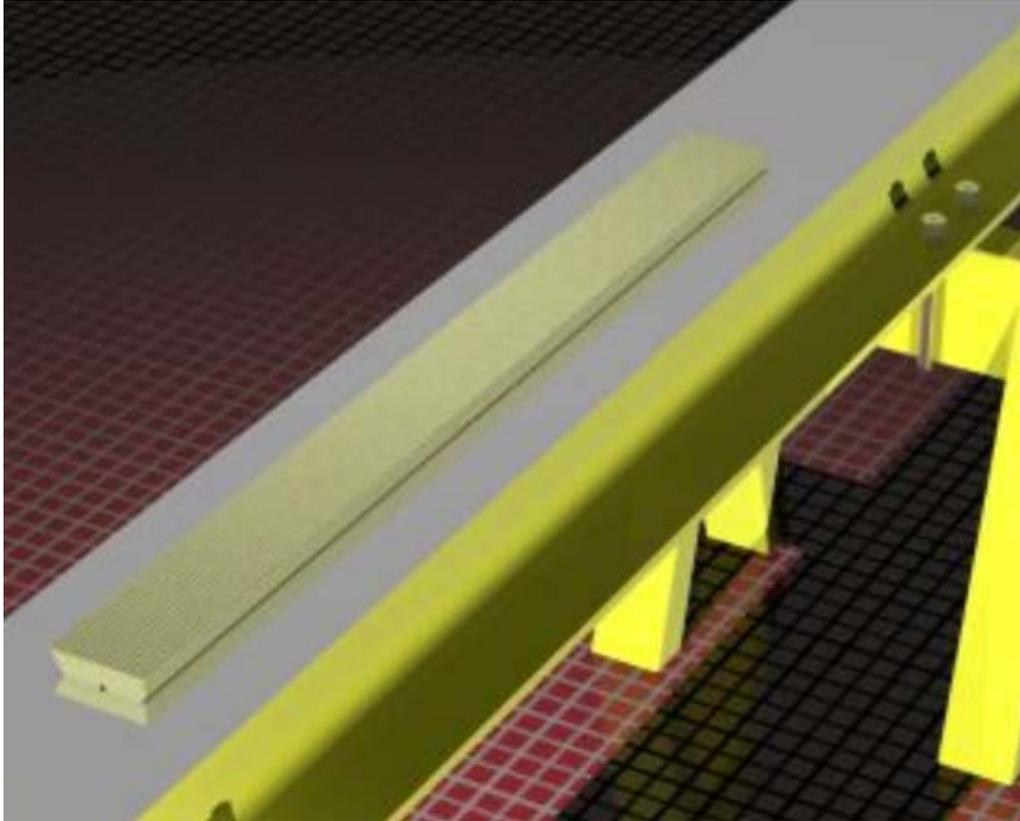


Figura 55: Pane di Rohacell con scanalature adagiato su banco di lavoro per verifiche di assialità ed uniforme profondità della scanalatura.

Il controllo della parte ricoperta dalla colla può essere eseguito tramite mascheramento delle superfici che non devono essere ricoperte, mediante una ricopertura preliminare alla fase di spruzzatura della colla con lamine di anticorrosione aventi scanalature di 2 mm di larghezza distanziate di un passo di 4 mm. Per eseguire una corretta ricopertura delle parti si deve prendere come riferimento il bordo del pane, applicando la maschera partendo dal bordo esterno del pezzo di Rohacell è possibile avere una distribuzione di colla allineata con il resto della struttura.

Depositato l'adesivo si passa all'assemblaggio dello strut con il core, è necessario tenere in pressione le parti per assicurare la corretta riuscita dell'operazione. Con l'ausilio di un blocco metallico calettato al basamento tramite viti è possibile applicare una pressione regolabile ai componenti realizzati per un tempo non inferiore ai 15 minuti, questo per permettere all'adesivo di

far presa, si veda figura 57. La pressione raggiunta è dell'ordine di 20 kg/m eventualmente regolabile e modulabile con un diverso serraggio delle viti. Le operazioni eseguite per una parte dell'interfaccia sono ripetute anche per l'altra.

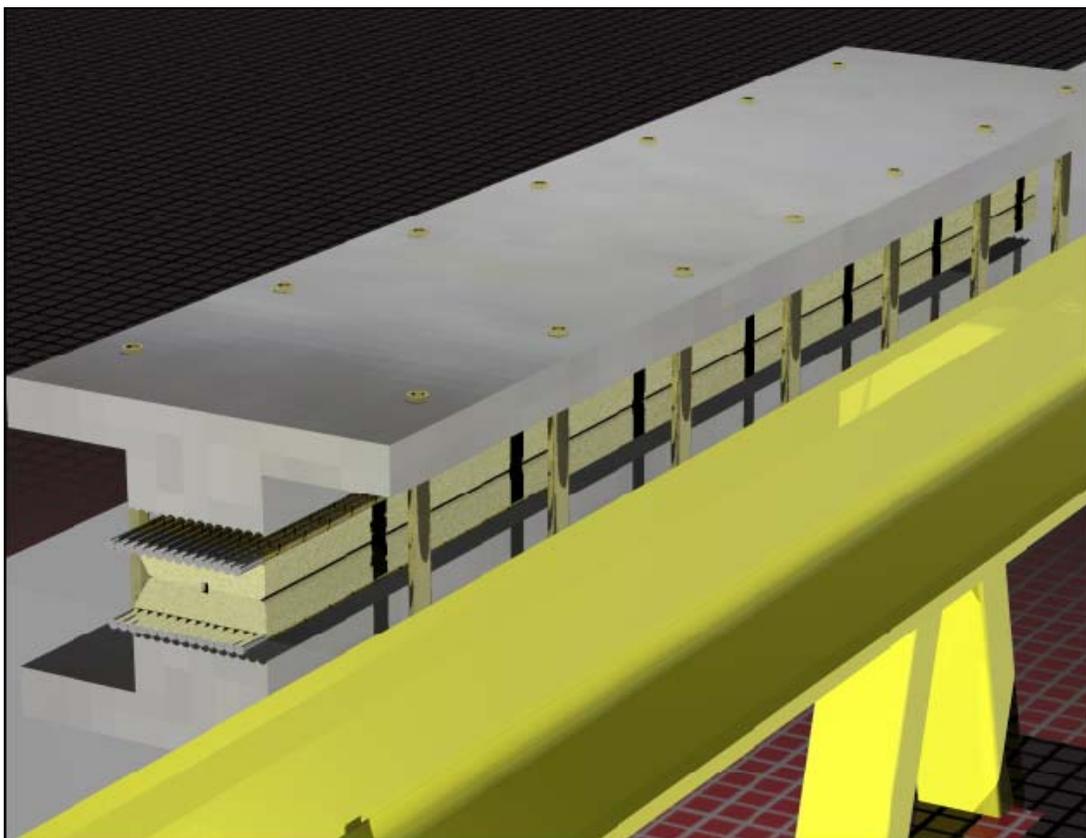


Figura 56: Pane di rohacell con pacchetto di 15 straws con sotto il pressore durante la fase di presa, durata 15 minuti.

5.5.2 Incollaggio degli straws all'interno del rohacell

Alla fase di assemblaggio delle parti della struttura composita segue l'incollaggio degli straws, è questa una fase delicata dell'intero processo per la necessità di tenere una buona circolarità della sezione di questi rivelatori durante tutto il processo. Per evitare problemi legati a

deformazione degli straws si è pensato di inserire nel loro interno dei tondini di acciaio rettificato o nichelato come quelli di figura 58 e 59, di diametro 4 mm³², si è verificato come la superficie interna dei rivelatori non risulta essere danneggiata dallo sfregamento con questi tondini dal momento che la nichelatura o la rettifica riducono notevolmente l'attrito tra le parti. Si sta valutando la possibilità di creare una rastrelliera di tondini in acciaio rettificato o nichelato, questo permetterebbe di riposizionare più straws per volta e di allinearli con maggior facilità all'interno del rohacell.

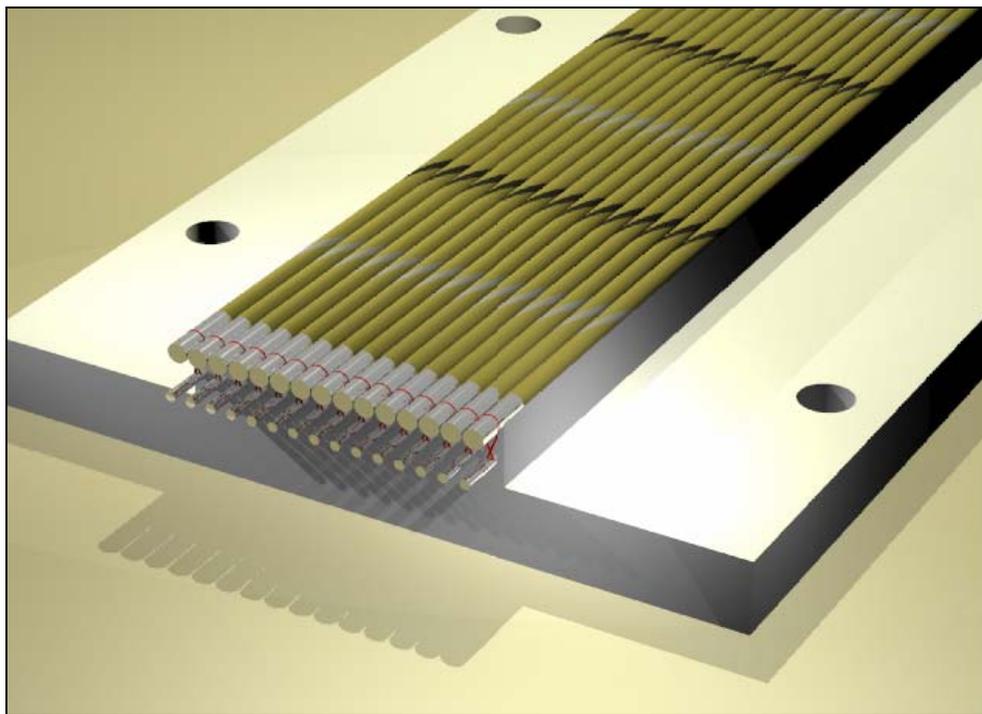


Figura 57: Tondini di acciaio inseriti all'interno degli straws prima di essere posti all'interno del pane di rohacell.

³² Per questo tipo di componentistica è richiesta una precisione di 0.02 mm, la macchina per la nichelatura o per la rettifica è in grado di assicurarla.

Per l'incollaggio degli straws viene utilizzata la stessa colla impiegata nello strut, lo spessore è sempre di 30 μm , e le modalità di applicazione prevedono anche in questo caso l'uso di aerografo per spruzzatura di precisione e di maschere in anticorodal per la ricopertura di parti su cui non si vuole avvenga l'incollaggio. Una fila di 15 straws è posta all'interno delle cavità del rohacell preventivamente cosparsa di colla, l'adesivo ha anche la funzione di riempire le eventuali cavità dell'espanso, si creerebbe in questo modo una superficie maggiormente uniforme. In figura 56 si riporta una cavità fatta nel rohacell con lo strato di colla ed i relativi spessori, si noti come per evitare fuoriuscite dell'adesivo si è pensato di porlo solo nella parte centrale e non vicino al bordo esterno. In accordo a quanto fatto per lo strut, si ricoprono i bordi con maschere per non far arrivare la colla.

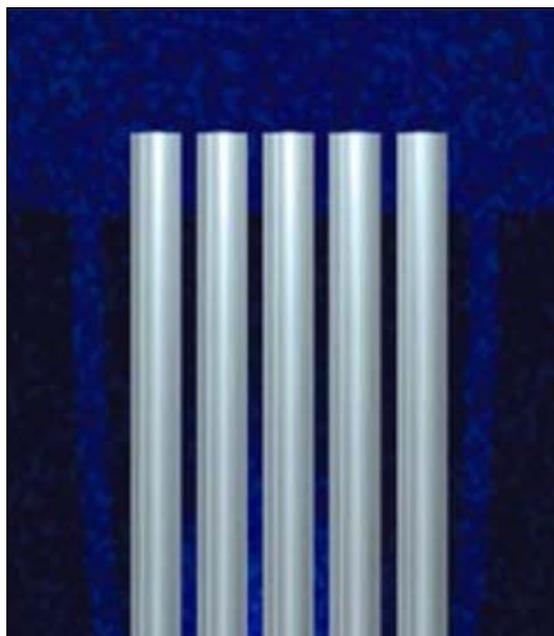


Figura 58: Tubi di acciaio rettificato o nichelato di diametro 3 mm da inserire negli straw-tubes durante le fasi di incollaggio per evitare deformazioni assiali e perdite di circolarità della sezione.

Cosparsa la colla, si rimuove la maschera e si posizionano nelle scanalature i 15 straws tubes separatamente. E' importante da sottolineare come l'adesivo ha un tempo di presa di 15 minuti, è questo l'intervallo massimo entro il quale assemblare la struttura. Quanto detto va ripetuto anche per l'altra parte del sandwich.

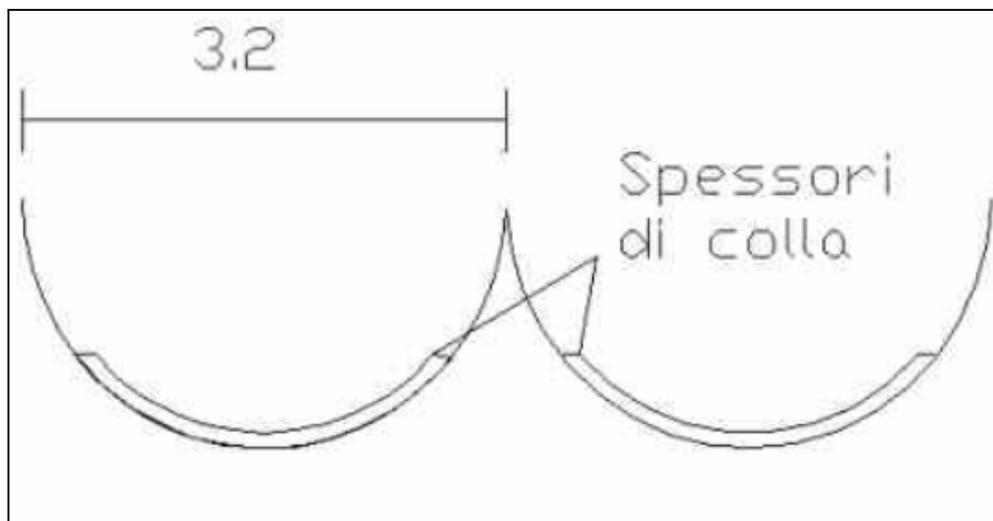


Figura 59: Distribuzione dello strato di $30\ \mu\text{m}$ di adesivo all'interno della scanalatura praticata prima dell'applicazione degli straws. Si noti come non è stata applicata colla lungo i bordi per evitare fuoriuscite.

In figure 61 e 62 si sono riportate alcune immagini di straws incollati a dei campioni di rohacell contenenti ancora un pezzo di anima in acciaio rettificato, la verifica dell'eccentricità eseguita visivamente ha dato risultati buoni. La sezione dello straw considerata non risulta essere distorta in seguito all'incollaggio, una buona circolarità è tenuta anche dopo la presa dell'adesivo. La verifica è stata fatta dopo alcuni giorni dall'incollaggio del pezzo di straw sul campione di rohacell.

Per quanto riguarda il posizionamento dei 15 straws della parte centrale del pacchetto da 45 è necessario applicare l'adesivo direttamente sulle file sovrastanti e sottostanti. I rivelatori di questa fila sono spostati della distanza di un raggio rispetto ai filari sotto e sovrastanti. Tra le file di straws

deve esserci uno spazio di 25 μm , qualora si decidesse di ridurre lo strato di colla è possibile tenere questa distanza con l'impiego di distanziali di opportuno spessore.



Figura 60: Immagine ravvicinata di un campione di rohacell 31 IG con due straws incollati negli solchi eseguiti, la verifica della circolarità dei sensori ha dato risultati positivi.



Figura 61: Altra immagine del campione di rohacell con i due straws incollati.

A fianco alle fasi di montaggio dell'interfaccia deve essere previsto un continuo monitoraggio degli straws, bisogna evitare che procedure errate introducano delle distorsioni in grado di inficiare il funzionamento di questa sensoristica.

5.5.3 Incollaggio delle due parti realizzate

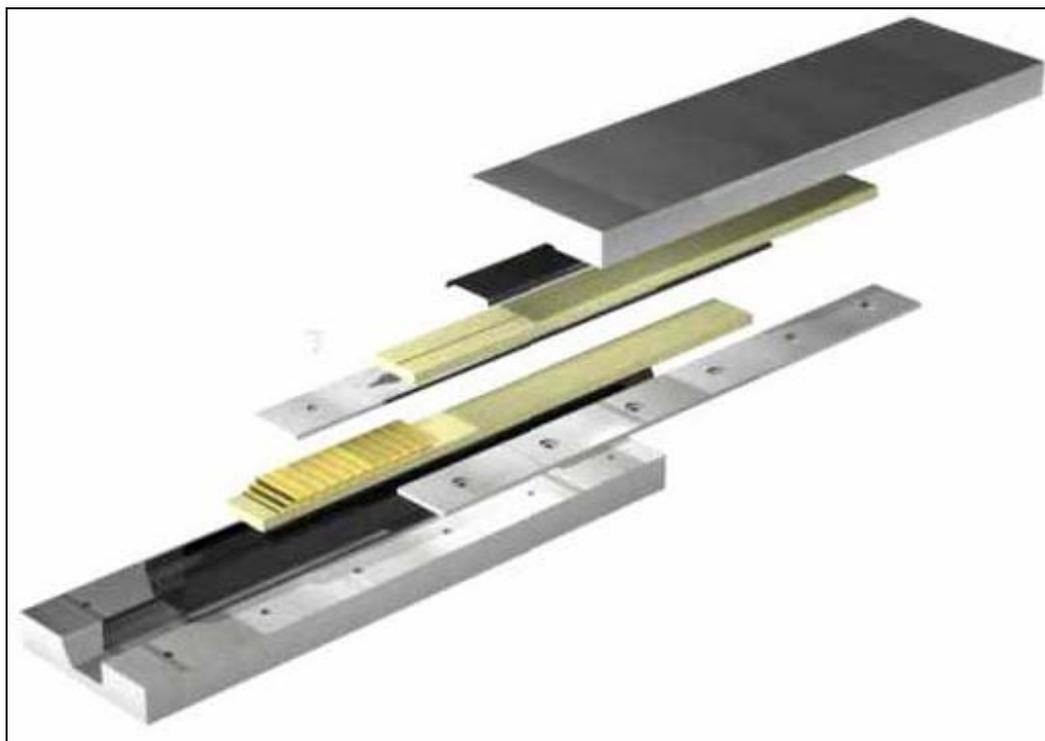


Figura 62: L'interfaccia italiana in un disegno esploso, da notare come lo stampo nella parte centrale presenta due lamine di 3 mm di spessore da rimuovere per porre le resistenze per far avvenire l'incollaggio tra le due parti.

Alla fine del montaggio di ogni fila di straws e quando si è assemblata l'intera struttura è necessario porre l'interfaccia sotto il pressore, descritto in precedenza, ogni volta che il pezzo è posto sotto questo dispositivo è necessario un tempo di circa 20 minuti per ultimare la presa, in questa fase deve essere garantita una pressione costante ed uniforme su tutto il componente. Nella

fase di assemblaggio tra le due parti del sandwich è necessario porre l'adesivo anche tra i lembi esterni delle pelli di carbonio in modo da avere adesione anche in quelle zone. In questa fase, lo strut è ancora posto nel suo stampo. Si rimuovono le due lamine poste sulla parte superiore, visibili in figura 63, al loro posto si vanno a porre delle piastre con resistenza. Applicata la colla a base di parylene anche tra le due parti dello strut accostano tra loro i lembi e si chiude lo stampo attivando le resistenze. L'interfaccia, così assemblata, rimane sotto il pressore per 20 ore, le resistenze scaldano la colla fino a temperatura di 60 °C in modo da far avvenire la presa.

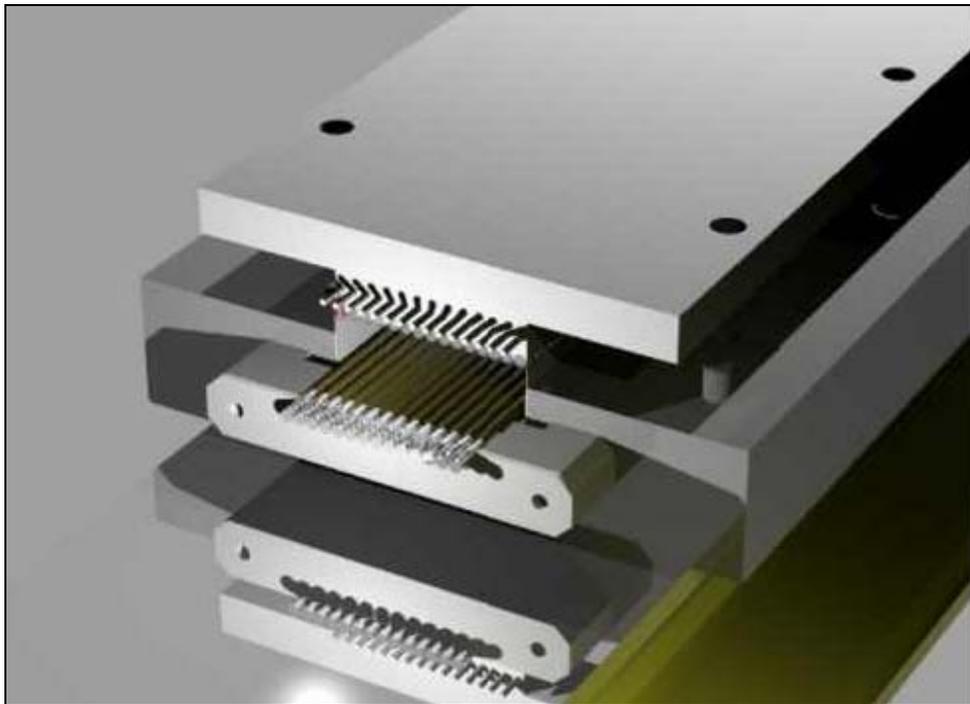


Figura 63: Pressore metallico durante la fase conclusiva di assemblaggio dell'interfaccia.

Durante l'intera durata del processo gli straws hanno sempre tenuto nel loro interno l'anima di acciaio rettificato, questa dovrebbe evitare distorsioni ai sensori. Si rimuovono i supporti di sostegno e le anime in acciaio precedentemente introdotto negli straws, si veda figura 64.

5.5.4 Inserimento sull'interfaccia di end-plates ed end-plugs

Per permettere l'inserimento degli end-plates è necessario avere dei supporti metallici all'interno dell'interfaccia a cui agganciarli. Queste parti, come già descritto nella fase di montaggio dello strut prima della cura in autoclave, devono essere poste come inserti all'interno della parte in carbonio, in questo modo si garantirebbe una continuità strutturale tra gli end-plate ed il resto dell'interfaccia maggiore di quella ottenibile per semplice incollaggio.

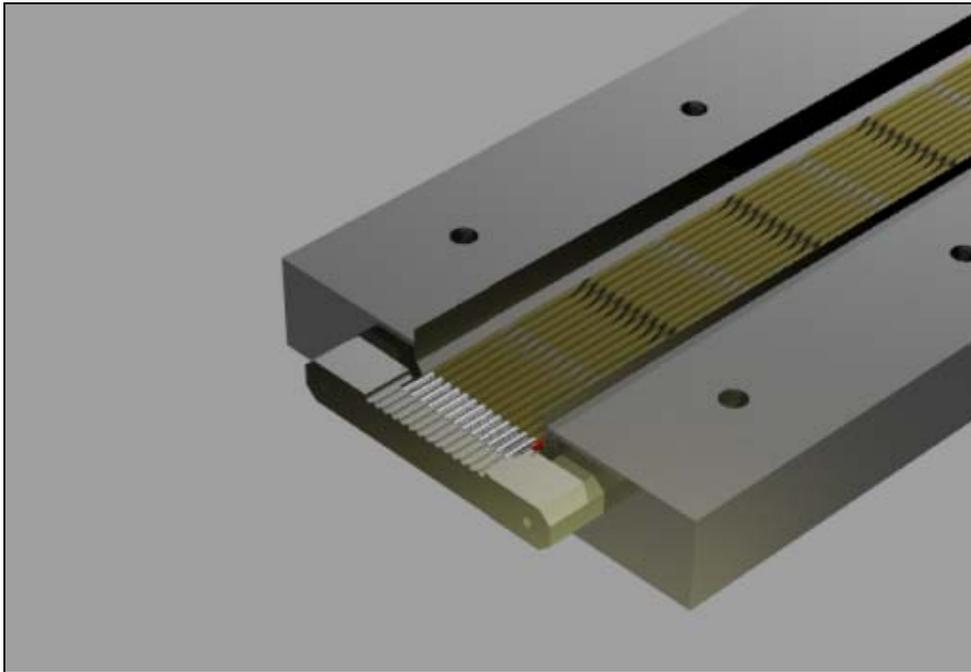


Figura 64: Fase di rimozione supporti esterni ed anime di anime di acciaio rettificato o nichelato in grado di avere un basso attrito tra le superfici ed allo stesso tempo dare la necessaria rigidità agli straws impedendo una loro perdita di eccentricità.

Prima di fissare gli end-plates e gli end-plugs è necessario far passare attraverso gli straws i twisters ed i filamenti di tungsteno, questi ultimi vengono tenuti in posizione da terminali in rame ottone da serrare sul filo quando questo è già stato tensionato. Ultimata questa fase si pongono alle due estremità dell'interfaccia gli end-plates e si incollano con adesivo conduttivo³³, come ultima fase si applicano gli end-plugs cosparsi in precedenza dello stesso adesivo conduttivo sopra menzionato nella parte interna, questo dovrebbe consentire una buona aderenza agli straws.

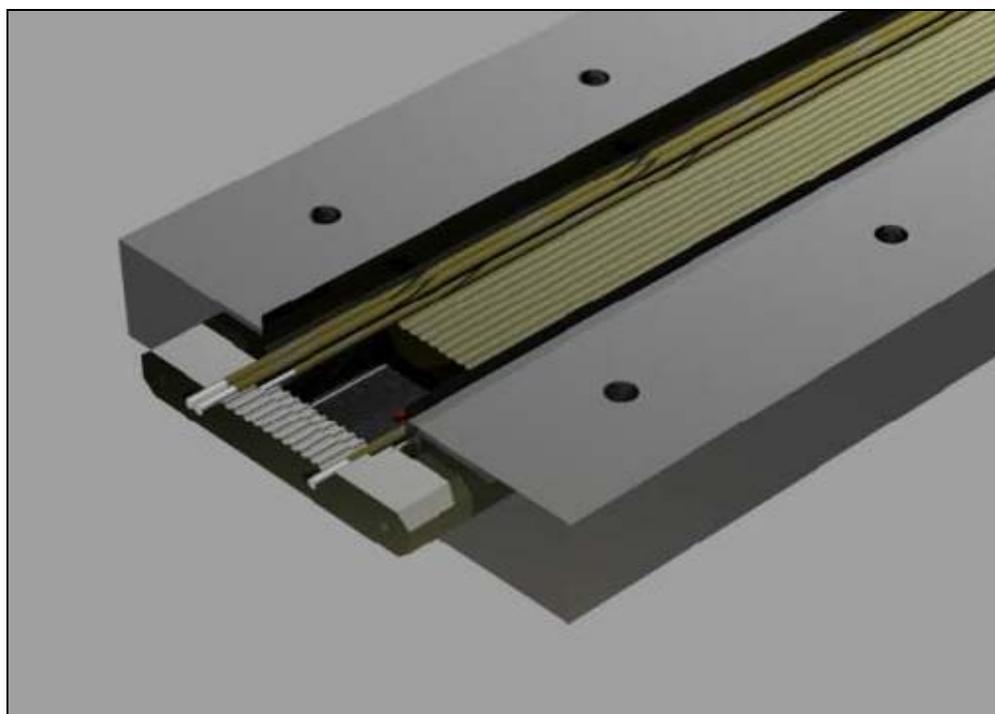


Figura 65: Fase di montaggio degli end-plates da inserire all'interno del supporto.

Fissati gli end-plates si ripassa ulteriormente la parte esterna di colla conduttiva, cospargendola con una siringa. Le operazioni di montaggio terminano con le rifiniture in cui si eliminano bave di adesivi in eccesso.

³³ Le specifiche di questo collante non sono note.

Capitolo 6

ANALISI COMPARATA: SOLUZIONE AMERICANA, INTERFACCIA ITALIANA.

Per soddisfare le esigenze della fisica dell'esperimento è necessario avere piccole masse attraversate dalle particelle e quindi obbligatorio ridurre al minimo le dimensioni, specie trasversali, ad impiegare dei materiali con buona trasparenza alle radiazioni, quindi con bassa densità, e non magnetizzabili. Allo stesso tempo è però richiesta una buona rigidezza della struttura per avere un corretto posizionamento e tensionamento degli straws. Le analisi sono state condotte prendendo come stazione di riferimento la quinta, in accordo a quanto eseguito dalla collaborazione statunitense, in tabella si riportano le dimensioni longitudinali e trasversali delle varie stazioni, le misure sono in mm.

Numero di stazione	Semi-lunghezza Trasversale	Lunghezza transetto
1	329.40	595.2
2	461.10	878.8
3	681.80	1300
4	964.40	1865.4
5	1105.70	2148.0
6	1247.00	2430.4
7	2094.71	4126.0

Tabella 15: Dimensioni in mm delle parti longitudinali e trasversali del fame per le varie stazioni, in rosso quella considerata nell'analisi.

Lo studio ha mirato alla valutazione del comportamento meccanico delle strutture, a fianco all'analisi classica si è anche effettuato un confronto tra le stesse, in questa circostanza si sono valutati i comportamenti delle due soluzioni in stesse condizioni di vincolo e carico oltre che con identiche specifiche e proprietà del materiale.

Prima di passare all'analisi dei due supporti per straws si ritiene di dover fare alcune precisazioni sulla settima stazione, per la quale è stata adottata una differente soluzione data la

rigidezza troppo bassa raggiunta in questo stadio. Altro aspetto brevemente trattato è la descrizione dell'interfaccia da montare attorno alla beam-pipe. Come già sottolineato in altre occasioni, su questa zona dell'esperimento non si possono ancorare strutture per evitare interazioni con il fascio di particelle, si rende quindi necessario prendere gli accorgimenti di seguito descritti.

6.1 Settima stazione

La settima stazione è la più grande, le sue dimensioni superano i quattro metri come quanto riportato in tabella 13. Dal punto di vista costruttivo in un primo momento si è pensato di realizzarla come tutte le altre, in seguito si è considerato che potrebbero esserci dei problemi dovuti alla vicinanza di sistemi di acquisizione dati (strips, ECAL, RICH³⁴) e alla rigidità troppo bassa complessivamente ottenibile in questo stadio. Per evitare spiacevoli contatti tra i dispositivi di rilevazione si è cercato di rendere la struttura più rigida con l'introduzione di moduli in fibra di carbonio con fori di diametro da definire posizionati lungo tutta la stazione. Il progetto prevede due soluzioni alternative:

- Introduzione di 7 moduli 48x4 mm,
- Introduzione 6 moduli 16x8 mm.

L'impiego di pannelli in fibra di carbonio permette di ridurre la freccia degli straws ed evita eventuali spanciamenti laterali della struttura. Il montaggio di queste parti deve essere eseguito manualmente ed individualmente per ogni stazione, il profilo della zona di contatto con il supporto esterno è realizzato con sezione estrusa. Tale sezione è in grado di incastrarsi nella parte esterna del

³⁴ Per alcune informazioni su questi rivelatori si guardi il capitolo 1 della presente tesi.

frame. Per realizzare questi componenti si utilizzano dei pre-preg in fibra di carbonio dello spessore 0.5 mm, si vedano figure 67 e 68.

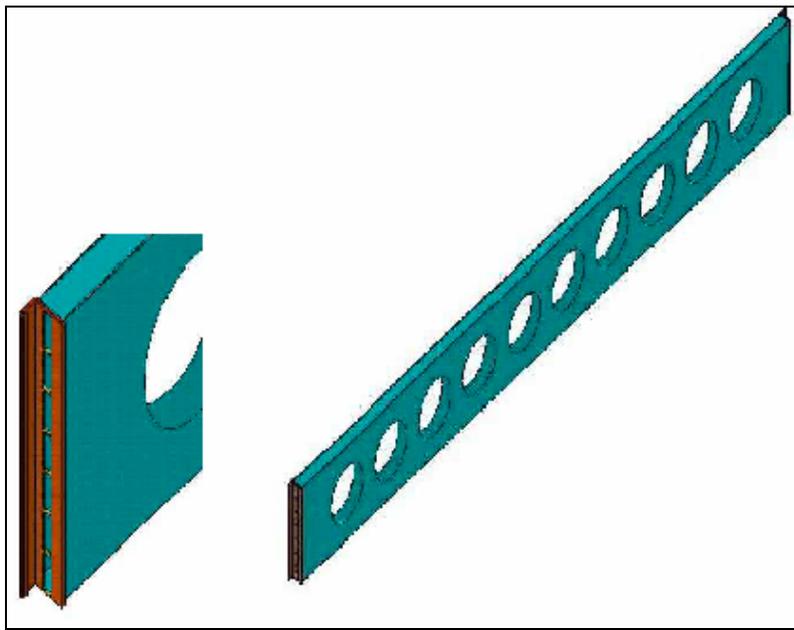


Figura 66: Immagine delle strutture in fibra di carbonio costituite da pre-preg dello spessore di 0,5 mm cadauno, 4 sono necessari per avere un modulo completo. Da notare come la presenza dei fori riduca notevolmente la massa introdotta, a sx il dettaglio di uno di questi moduli raffigurante la sezione che si va ad incastrare sul frame.

La sezione del modulo centrale è particolare in quanto deve prevedere la un foro di dimensioni pari a quelle della beam-pipe per allinearsi con essa in fase di montaggio.

Questi moduli vengono calettati alla parte esterna dei supporto e si allineano con il bordo con il quale vengono a contatto. Ogni modulo in oltre è agganciato individualmente al freme, dal punto di vista strutturale non ci sono vincoli tra moduli contigui, il collegamento è realizzato con barre di connessione calettate al freme.

Una struttura di questo tipo, date le ridotte dimensioni della sezione del frame, può creare problemi non essendoci lo spazio necessario per affiancare questi collegamenti all'elettronica ed

all'impianto di raffreddamento.

Sono attualmente in studio soluzioni per conciliare le esigenze e gli ingombri delle varie parti costituenti l'impianto.

Altri aspetti in osservazioni sono:

- Assemblaggio tra le varie parti;
- Integrazione tra elettronica impianto di raffreddamento e moduli in carbonio;
- Inserimento all'interno della stazione;
- Test per l'analisi strutturale con prototipi in scale reale;
- Possibili materiali alternativi.

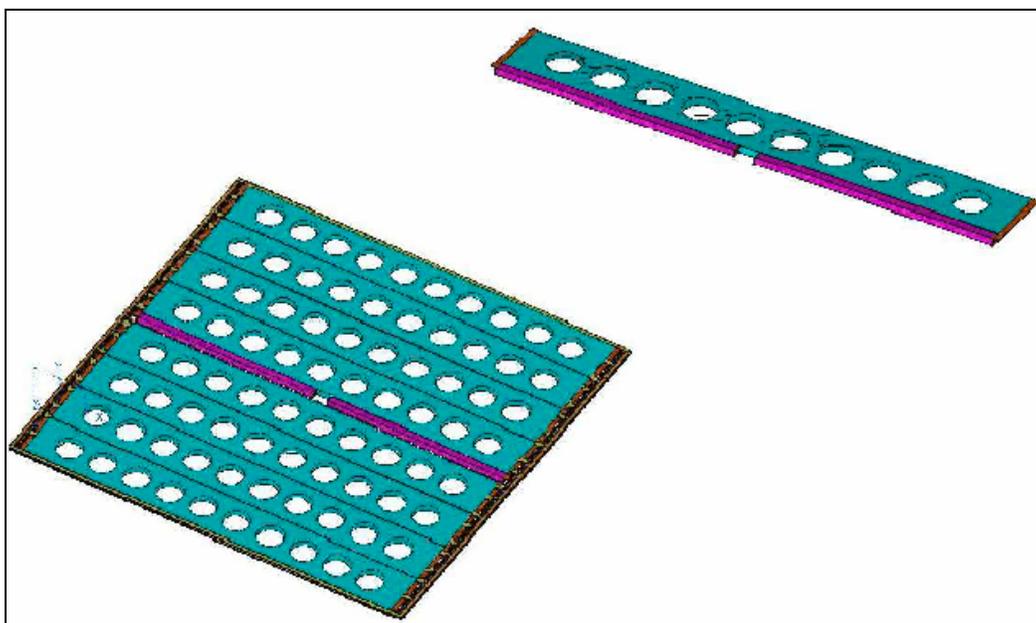


Figura 67: Rappresentazione dell'intero corpo dei moduli da inserire sull'ultima stazione, da notare come le due unità centrali sono differenti dalle altre per consentire il passaggio della beam-pipe, in alto a dx un dettaglio di questa unità.

6.2 Posizionamento straws nella zona a ridosso della beam-pipe

Dal momento che non è possibile collegarsi direttamente alla componentistica costituente la beam-pipe, è necessario trovare soluzioni alternative in grado di permettere l'acquisizione dati nelle zone immediatamente contigue tale regione senza in nessun modo interagire con essa. La soluzione più semplice trovata è stata quella di prevedere l'interruzione dei supporti e della sensoristica nella zona immediatamente contigua alla beam-pipe, in figura 69 si riporta un particolare dell'interfaccia italiana in tale zona. Come si può notare dal dettaglio riportato in figura sono stati introdotti degli end-plates aggiuntivi a ridosso della beam-pipe, questi si vanno ad inserire ed ancorare in una scatola realizzata in composito posta attorno alla zona della beam-pipe.

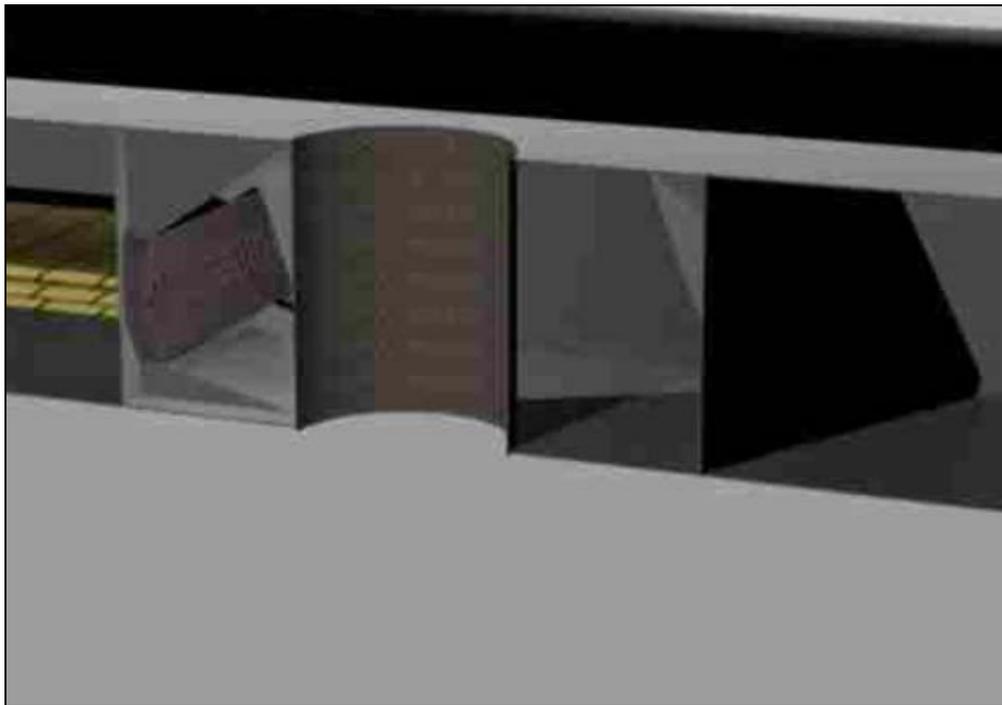


Figura 68: Soluzione americana a “C”, end-plate e scatola in composito nella zona circostante la beam-pipe.

6.3 Soluzione americana

La soluzione americana proposta per l'interfaccia prevede la realizzazione di un componente la cui sezione è quella riportata in figura 70, esso è realizzato con sacco a vuoto per il composito e successivo incollaggio delle parti e dei due cores di rohacell. Dovendo essere sottesa tra i due estremi opposti del supporto e non essendo possibili eventuali interruzioni nella continuità strutturale dell'unità realizzata è necessario avere dei componenti di lunghezza pari alla stazione alla quale si va ad ancorare. Si è rappresentata in figura 71 un dettaglio della quinta stazione per far notare il giusto posizionamento della struttura all'interno del frame, essa risulta posta nella parte centrale a distanza di 32,2 cm dal punto di mezzeria per lasciar spazio alla beam-pipe. Nel restante tratto si va a realizzare un supporto per straws interrotto nel punto di mezzeria secondo quanto descritto nel paragrafo 6.2.

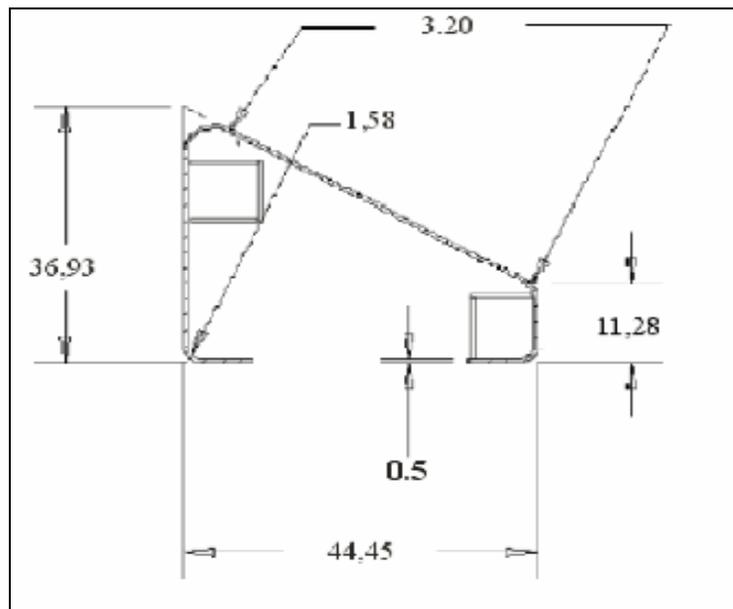


Figura 69: Sezione di base dell'interfaccia statunitense, le dimensioni riportate sono in mm.

Lo spessore del composito è di 0,5 mm, pari a 4 pelli di pre-preg, è tenuto costante per tutta la sezione tranne che nelle zone di incollaggio dei due sandwich con core in rohacell nelle quali si ha uno spessore doppio. La forma particolare della sezione ed i suoi ingombri sono dettati da caratteristiche costruttive dell'esperimento e da esigenze legate alla sensoristica ed all'acquisizione dei dati. La sezione di base è stata studiata in modo da contenere solo un pacchetto di rivelatori, la parte obliqua permette di potersi inserire nella struttura senza andare a contatto con i contigui straws.

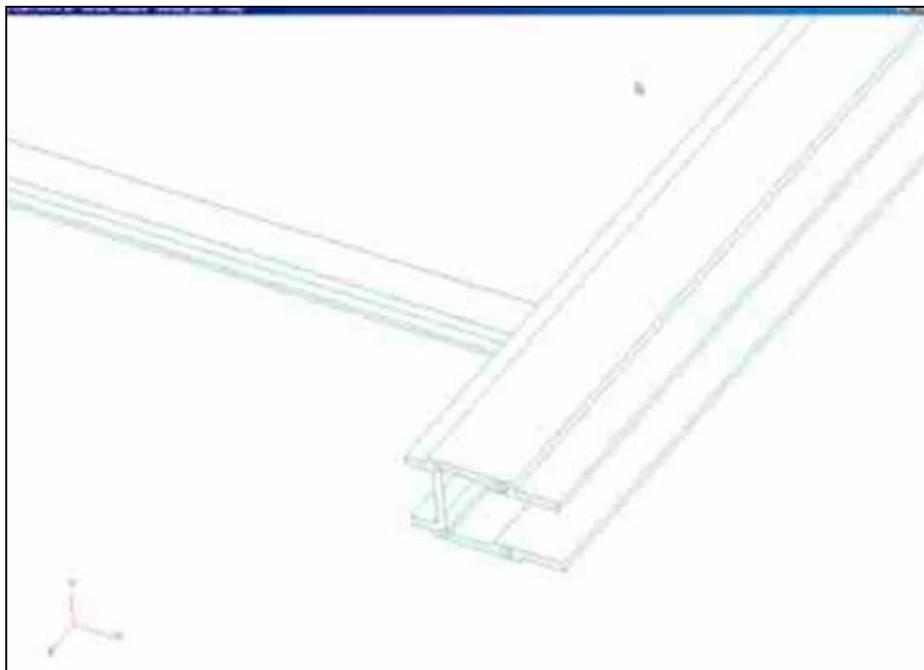


Figura 70: Parte del frame, da notare il posizionamento dell'interfaccia per straws rispetto al bordo di mezzeria del frame. La distanza da tale bordo è necessaria per permettere il passaggio della beam pipe.

La realizzazione di due strutture composite costituite da pre-preg, con sezione quadrata e di forma tubolare, e da un core in rohacell ha realizzato un aumento di rigidità, senza aumentare di molto il quantitativo di massa introdotto.

Gli straws sono sotesi tra le due opposte estremità del supporto, sono sottoposti a trazione e successivamente incollati agli end-plates³⁵, questa esigenza deriva dal dover conferire a questi sensori un corretto posizionamento e soprattutto una bassa eccentricità. Per questi motivi è necessario curare molto la parte di montaggio ed ancoraggio alla struttura, si devono evitare eventuali rilassamenti o distorsioni dell'interfaccia.

Le condizioni di vincolo e carico prevedono di avere una struttura incastrate ad un'estremità e caricata dalla parte opposta, le sollecitazioni impresse alla struttura sono state:

- Sforzo assiale di intensità 1000 N;
- Momento flettente di intensità 1 Nm;
- Momento torcente di intensità 1 Nm;

I materiali usati sono: rohacell IG con densità 0.032 kg/m^3 per gli espansi e composito costituito da pre-preg con matrice epossidica e fibra lunga unidirezionale in carbonio. Le fibre dell'angle-ply si sono supposte avere una orientazione variabile, prendendo come angolo zero quello orientato lungo la direzione della sollecitazione, si sono studiate le seguenti disposizioni: $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$, $0^\circ/10^\circ/-10^\circ/0^\circ$, $0^\circ/20^\circ/-20^\circ/0^\circ$, $0^\circ/30^\circ/-30^\circ/0^\circ$, $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ$, $0^\circ/60^\circ/-60^\circ/0^\circ$, $0^\circ/70^\circ/-70^\circ/0^\circ$, $0^\circ/80^\circ/-80^\circ/0^\circ$, $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$.

Per non avere un crollo troppo accentuato delle proprietà meccaniche si sono tenute nella direzione della sollecitazione sempre due dei 4 pre-preg impiegati. Si è cercato in ogni caso di realizzare una disposizione simmetrica.

³⁵ Per approfondimenti su questa componentistica si guardi il capitolo 4 relativo al montaggio dell'interfaccia italiana. Gli end-plates utilizzati, per esigenze costruttive sono differenti per le due soluzioni.

6.3.1 Modello agli elementi finiti ed analisi dei risultati

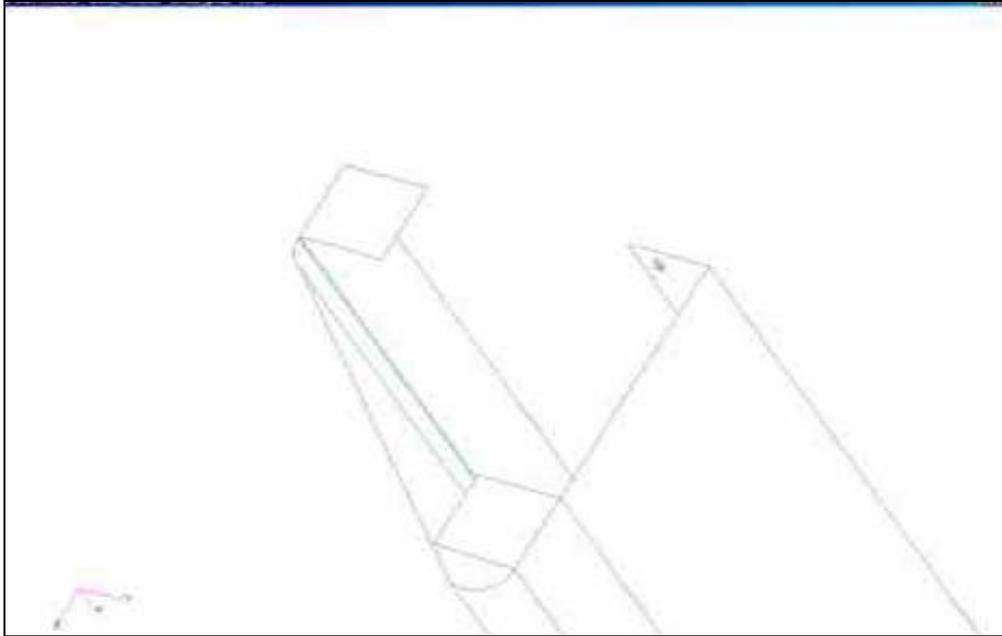


Figura 71: Riproduzione al FEM della sezione della soluzione americana senza la mesh, il disegno originale è quello di figura 70.

Il modello realizzato al FEM impiega degli elementi bidimensionali (Quad4) per schematizzare le pelli del pre-preg e dei 3-D per la realizzazione dell'espanso. In particolare per la rappresentazione del foam si sono adoperati degli Hexa ottenuti con estrusione³⁶ della mesh bidimensionale (Quad4) realizzata in base, secondo quanto riportato in figura 70, in figura 72 la riproduzione della stessa sezione così come è stata realizzata al FEM.

Le dimensioni sono quelle nominali del progetto, nel caso della quinta stazione la lunghezza della struttura è pari a 2,148 m. Per ogni diversa disposizione delle fibre dell'angle-ply si sono eseguite le simulazioni e, valutati i risultati, si sono calcolate le corrispondenti rigidità. Per il calcolo della rigidità assiale si è inizialmente considerata la relazione:

³⁶ Il termine usato nel linguaggio Patran, in altre parole dell'interfaccia software usato è: "Sweep".

$$N=EA\varepsilon \quad (2)$$

Essendo:

N, la forza assiale applicata [N],

E, il modulo elastico longitudinale [Pa];

A, l'area della sezione di base [m²];

ε , l'allungamento relativo in funzione della lunghezza iniziale, esprimibile anche come $\Delta l/l_0$,

con Δl pari al valore dell'allungamento assoluto ed l_0 pari alla lunghezza iniziale.

Disposizione delle fibre [gradi]	Spostamento in direzione assiale [mm]	Rigidezza assiale Calcolata [N/m]
0°/0°/0°/0°	0.100	10.00x10 ⁶
0°/10°/-10°/0°	0.140	7.14x10 ⁶
0°/20°/-20°/0°	0.175	5.71x10 ⁶
0°/30°/-30°/0°	0.194	5.16x10 ⁶
0°/45°/-45°/0°	0.212	4.72x10 ⁶
0°/60°/-60°/0°	0.216	4.63x10 ⁶
0°/70°/-70°/0°	0.219	4.56x10 ⁶
0°/80°/-80°/0°	0.220	4.55x10 ⁶
0°/90°/90°/0°	0.222	4.51x10 ⁶

Tabella 16: Deformazioni e rigidezze assiali calcolate dall'equazione 2 per differenti orientazioni delle fibre dell'angle-ply nella soluzione americana. Gli angoli sono presi a partire dalla direzione della sollecitazione.

Se si riscrive l'equazione 1 nella seguente forma, si ha l'espressione per la rigidezza assiale divisa per la lunghezza iniziale l_0 :

$$\frac{N}{\Delta l} = \frac{EA}{l_0} \quad (3)$$

I valori ottenuti sono quelli riportati in tabella 2.

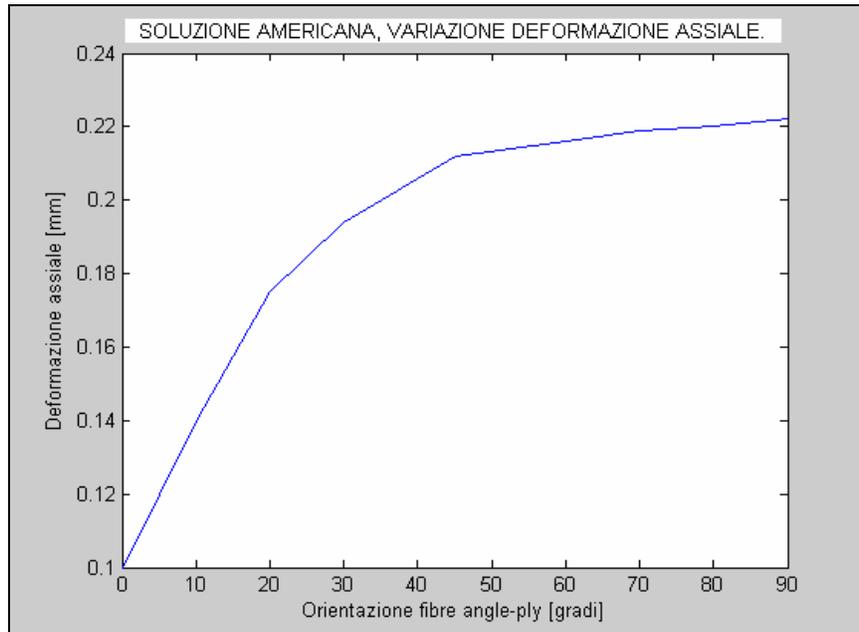


Figura 72: Soluzione americana, variazione dell'allungamento assiale in funzione delle differenti orientazioni delle fibre del pre-preg riportate in ascissa.

Si sono plottati nelle figure 73 e 74 i risultati riportando la variazione di spostamento in funzione della differente orientazione delle fibre, si è inoltre valutata la variazione di rigidità assiale in funzione della diversa disposizione dell'angle-ply.

In modo analogo a quanto fatto per lo sforzo assiale si sono ripetute le analisi al FEM per la sollecitazione flessionale, per il calcolo della corrispondente rigidità rapportata alla lunghezza iniziale si è fatto uso della relazione:

$$\frac{EJ}{L} = \frac{M}{\phi} \quad (4)$$

Essendo:

E, il modulo elastico longitudinale del componente [Pa];

J, il momento di inerzia flessionale [kgxm^2];

L, la lunghezza del componente [m];

M, il momento flettente [Nm];

φ , l'angolo di rotazione attorno all'asse di flessione [rad].

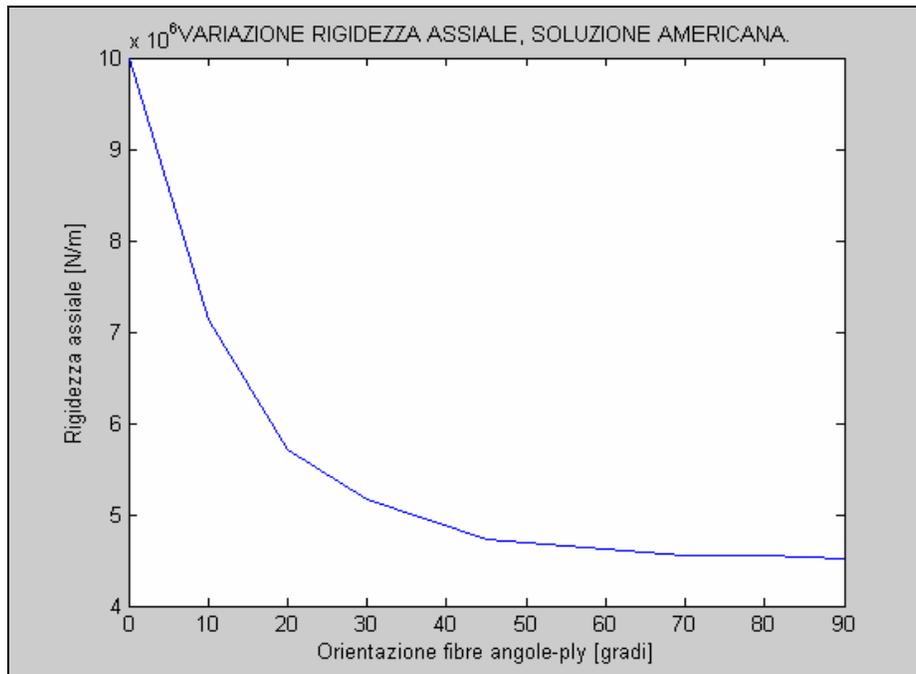


Figura 73: Soluzione americana, variazione della rigidità della struttura complessiva in funzione della differente orientazione delle fibre del pre-preg.

Si sono calcolati i vari angoli di rotazione per effetto della flessione e si sono determinate le corrispondenti rigidzze in funzione della diversa orientazione delle fibre composito costituente l'angle-ply. I valori sono riportati nella tabella 17, nelle figure 75 e 76 sono graficate le rotazioni attorno all'asse di flessione e le rigidzze flessionali in funzione della differente disposizione dell'angle-ply.

Disposizione delle fibre [gradi]	Rotazione attorno All'asse di flessione [rad]	Rigidezza flessionale Calcolata [Nm/rad]
0°/0°/0°/0°	6.78x10 ⁻⁷	1.475x10 ⁶
0°/10°/-10°/0°	8.87x10 ⁻⁷	1.127x10 ⁶
0°/20°/-20°/0°	9.53x10 ⁻⁷	1.049x10 ⁶
0°/30°/-30°/0°	9.80x10 ⁻⁷	1.020x10 ⁶
0°/45°/-45°/0°	10.01x10 ⁻⁷	1.00x10 ⁶
0°/60°/-60°/0°	10.11x10 ⁻⁷	0.999x10 ⁶
0°/70°/-70°/0°	10.15x10 ⁻⁷	0.998x10 ⁶
0°/80°/-80°/0°	10.20x10 ⁻⁷	0.998x10 ⁶
0°/90°/90°/0°	10.21x10 ⁻⁷	0.997x10 ⁶

Tabella 17: Rotazioni e rigidezze flessionali calcolate dall'equazione 3 per differenti orientazioni delle fibre dell'angle-ply nella soluzione americana. Anche in questo caso gli angoli dell'angle-ply sono presi a partire dalla direzione della sollecitazione.

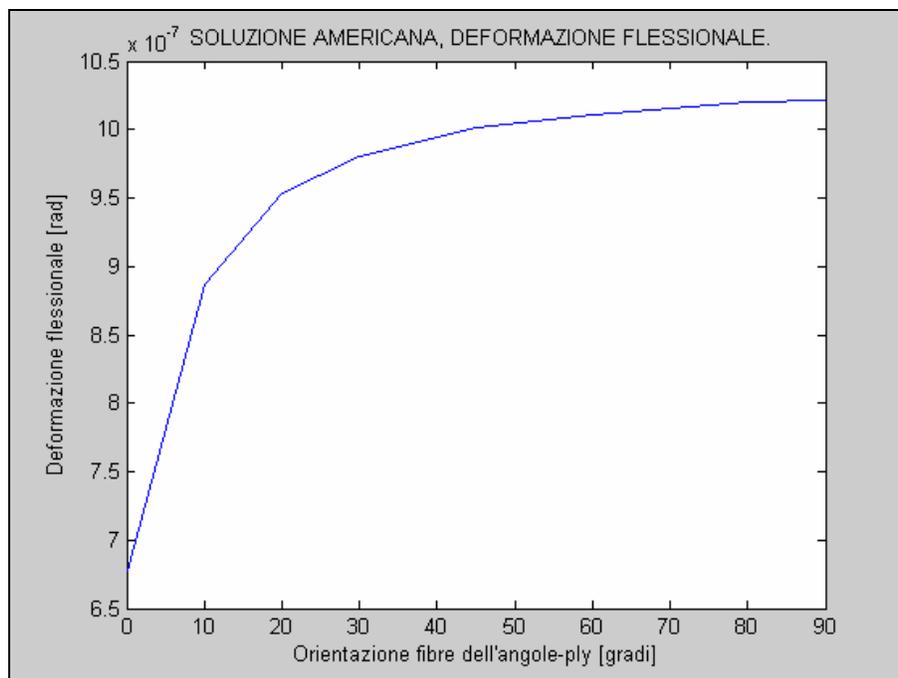


Figura 74: Soluzione americana, variazione della rotazione attorno all'asse di flessione in funzione dell'orientazione delle fibre del pre-preg in seguito all'applicazione di un momento flettente di intensità unitaria.

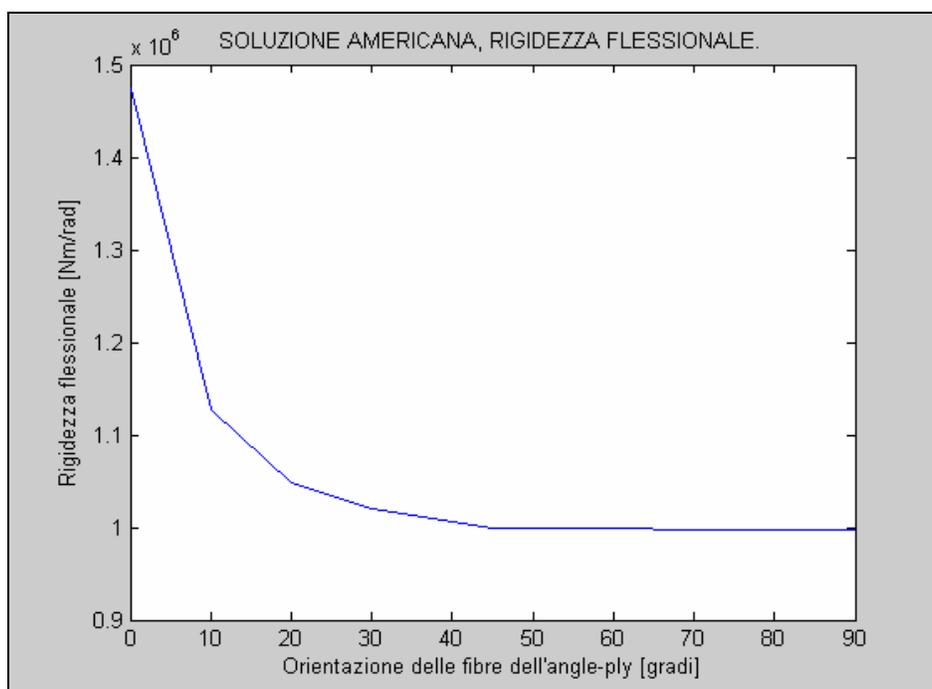


Figura 75: Soluzione americana, dipendenza della rigidezza flessionale dall'orientazione delle fibre del pre-preg.

Disposizione delle fibre [gradi]	Rotazione attorno All'asse di torsione[rad]	Rigidezza torsionale Calcolata [Nm/rad]
0°/0°/0°/0°	7.466×10^{-4}	1.339×10^5
0°/10°/-10°/0°	7.338×10^{-4}	1.363×10^5
0°/20°/-20°/0°	7.103×10^{-4}	1.408×10^5
0°/30°/-30°/0°	6.784×10^{-4}	1.474×10^5
0°/45°/-45°/0°	6.362×10^{-4}	1.572×10^5
0°/60°/-60°/0°	5.696×10^{-4}	1.756×10^5
0°/70°/-70°/0°	5.387×10^{-4}	1.858×10^5
0°/80°/-80°/0°	5.002×10^{-4}	1.999×10^5
0°/90°/90°/0°	4.560×10^{-4}	2.193×10^5

Tabella 18: Soluzione americana, angolo di torsione e rigidezza corrispondente in funzione delle differenti orientazioni dell'angle-ply.

All'analisi flessionale è seguito lo studio della struttura per un carico di tipo torsionale ed intensità unitaria, si sono quindi calcolate le corrispondenti rigidezze torsionali, la relazione di riferimento in questo caso è alla relazione riportata nell'equazione 4:

$$\frac{GJ}{L} = \frac{M}{\phi} \quad (5)$$

In cui si è usata la seguente simbologia:

G, modulo di taglio [Pa];

J, momento d'inerzia polare o torsionale;

L, lunghezza del componente [m];

M, momento torcente [Nm];

ϕ , l'angolo di rotazione rispetto all'asse attorno al quale avviene la torsione [rad].

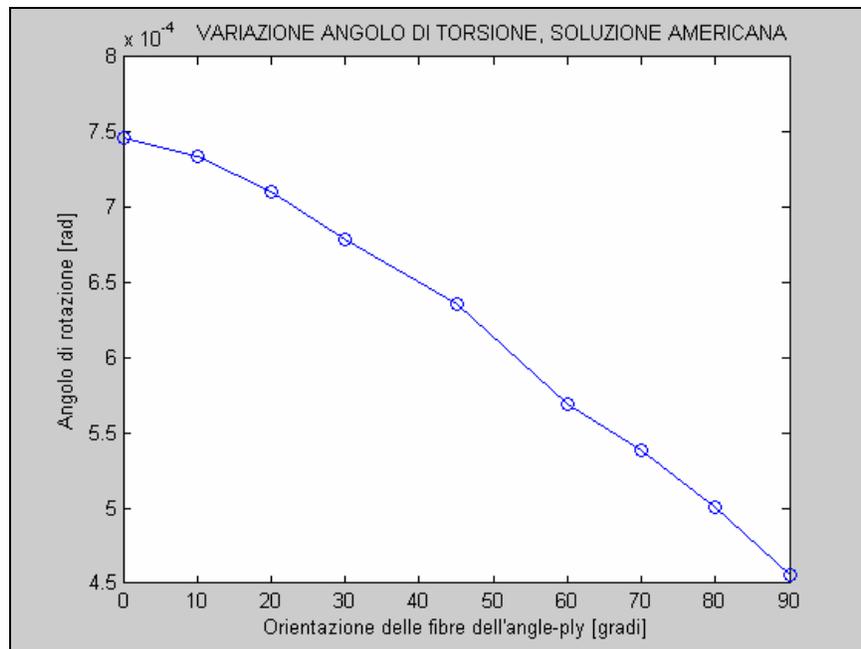


Figura 76: Soluzione americana, variazione della rotazione attorno all'asse di torsione in seguito alla diversa orientazione delle fibre del pre-preg.

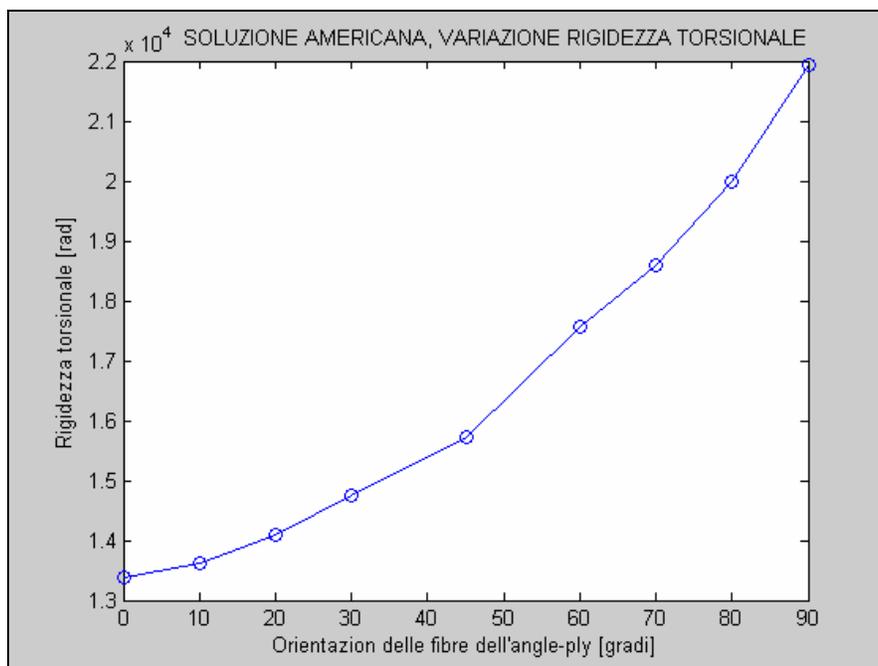


Figura 77: Soluzione americana, orientazione delle fibre del pre-preg in funzione della rigidzza torsionale calcolata per le varie orientazioni delle fibre.

In tabella 18 sono riportati i risultati ottenuti mentre in figura 77 e 78 sono plottati i vari risultati, come fatto anche per gli altri casi sono state graficate la rotazione attorno all'asse di torsione e la corrispondente variazione di rigidezza in funzione della differente orientazione delle fibre dell'angle-ply.

6.4 Soluzione italiana

In modo analogo a quanto fatto per la soluzione americana, si è presa in considerazione quella italiana; la sezione di base è quella riportata in figura 79. Anche in questo caso la forma è strettamente dettata da esigenze di progetto, la necessità di non dover superare i limiti di ingombro introdotti dalla presenza di gruppi di straws da una parte e la presenza della beam-pipe dall'altra, ha portato ad avere precise dimensioni di base, condizionate anche dalla posizione dei rilevatori in essa

contenuti. La soluzione italiana proposta per la realizzazione dell'interfaccia prevede la realizzazione di una struttura costituita da un sandwich con delle pelli in composito, matrice epossidica, unidirezionale in fibra di carbonio, ed espanso in rohacell IG con densità di 0.032 kg/m^3 , indicato con il nome commerciale di Rohacell 31. Lo spessore del pre-preg è in questo caso è quello di 2 sole pelli, pari a 0,25 mm, ovvero la metà di quello americano che invece ne adopera 4; il componente è realizzato con sacco da vuoto e successivo incollaggio delle parti³⁷. Il componente deve essere ancorato tra gli opposti estremi del supporto e non sono ammesse delle interruzioni nella continuità strutturale, le dimensioni delle varie stazioni sono quelle di tabella 15.

Come più approfonditamente descritto nelle seguenti sezioni, non è necessario tensionare questo pacchetto di rivelatori dal momento che il corretto posizionamento e una sufficiente eccentricità è conferita dall'incollaggio degli straws con il foam e dalla presenza di twisters.

Le condizioni di vincolo e carico prevedono di avere una struttura incastrata da una estremità e caricata dall'altra, le sollecitazioni introdotte nella struttura sono state anche in questo caso:

- Carico assiale di intensità 1000 N;
- Sollecitazione di flessione di intensità 1 Nm;
- Momento torcente di intensità 1 Nm.

Le fibre dell'angle-ply si sono supposte avere una orientazione variabile, prendendo come angolo zero la direzione della sollecitazione, si sono studiate le seguenti disposizioni: $0^\circ/0^\circ$, $0^\circ/10^\circ$, $0^\circ/20^\circ$, $0^\circ/30^\circ$, $0^\circ/45^\circ$, $0^\circ/60^\circ$, $0^\circ/70^\circ$, $0^\circ/80^\circ$, $0^\circ/90^\circ$.

³⁷ Per un analisi più dettagliata della procedura di realizzazione e montaggio delle parti si guardi il capitolo 4 nella sezione dedicato alla realizzazione dell'interfaccia.

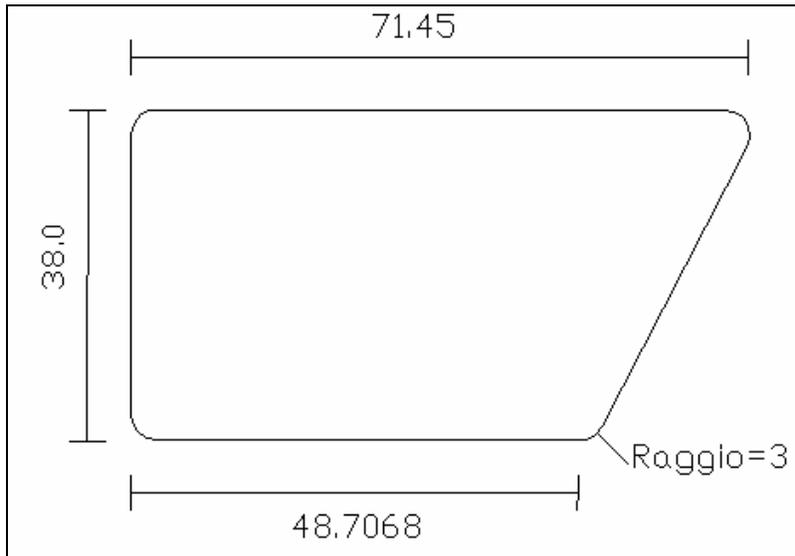


Figura 78: Disegno AutoCad della sezione di base della soluzione italiana con le corrispondenti quote, lo spessore è di 0.25 mm.

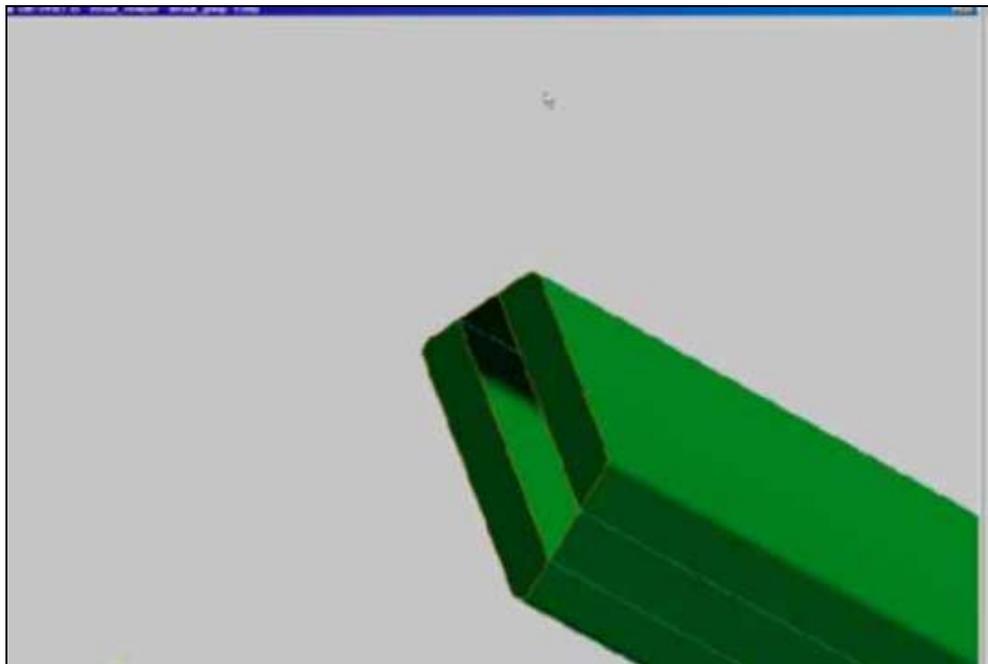


Figura 79: Profilo della sezione italiana secondo quanto eseguito nel calcolo agli elementi finiti, la parte interna al sandwich rappresenta la zona in cui introdurre gli straws, per non complicare eccessivamente il modello e non introdurre elementi non aventi funzioni strutturali e quindi non utili per il calcolo non si sono fatti gli svassi in cui alloggiare i sensori di cui si faceva cenno.

In questo caso, in accordo con quanto fatto per la soluzione americana, si è variata solo la direzione di una delle due pelli di composito, si è in questo modo evitato un crollo delle proprietà meccaniche possibile nel caso in cui almeno uno dei pre-preg non avesse le fibre allineate con la direzione della sollecitazione.

6.4.1 Modello agli elementi finiti ed analisi dei risultati

La simulazione eseguita ha realizzato l'interfaccia accoppiando elementi bidimensionali con i 3-D. I primi sono stati utilizzati per la realizzazione delle pelli di composito, in accordo con il progetto si è assunto lo spessore dei Quad4 pari a 0.25 mm, sono quindi state impostate le proprietà del materiale e le angolazioni della fibra di carbonio in accordo ai dati di progetto. Per la realizzazione del foam si sono invece impiegati degli elementi solidi, gli Hexa, ottenuti con uno "sweep" di una preliminare mesh eseguita sulla sezione di base con dei Quad4 poi eliminati.

Disposizione delle fibre [gradi]	Spostamento in direzione assiale [mm]	Rigidezza assiale Calcolata [N/m]
0°/0°	0.131	7.63x10 ⁶
0°/10°	0.180	5.56x10 ⁶
0°/20°	0.221	4.52x10 ⁶
0°/30°	0.240	4.17x10 ⁶
0°/45°	0.247	4.05x10 ⁶
0°/60°	0.249	4.02x10 ⁶
0°/70°	0.252	3.97x10 ⁶
0°/80°	0.253	3.95x10 ⁶
0°/90°	0.254	3.94x10 ⁶

Tabella 19: Soluzione italiana, deformazioni e rigidezze assiali calcolate dall'equazione 2 per differenti orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

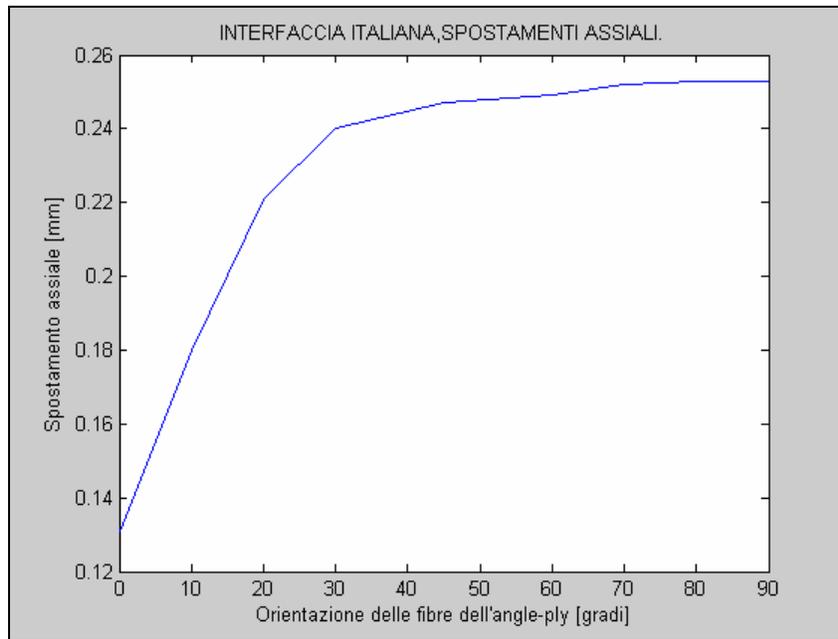


Figura 80: Soluzione italiana, deformazioni assiali in funzione delle differenti orientazioni dell'angle-ply.

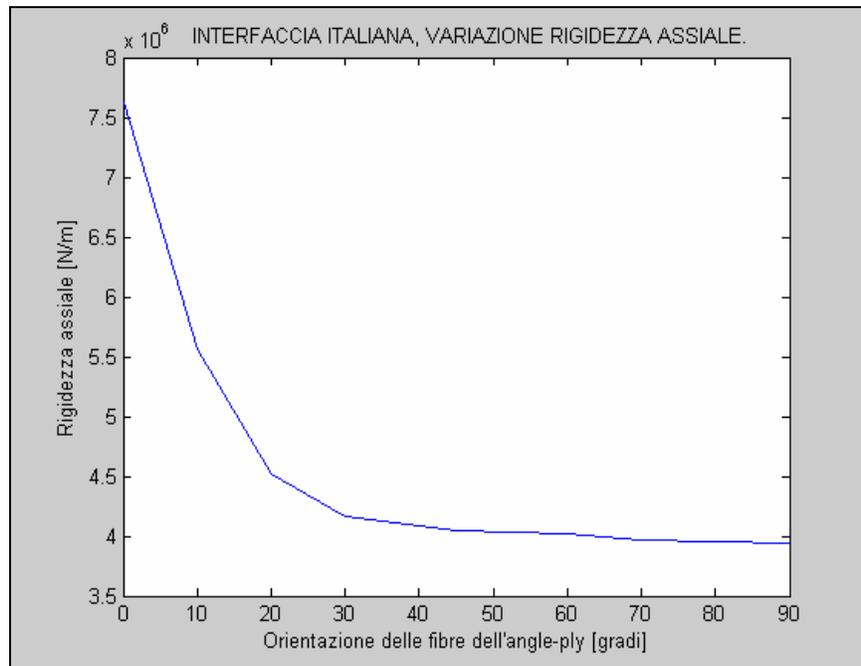


Figura 81: Interfaccia italiana, variazione della rigidezza assiale in funzione della differente orientazione delle fibre lunghe dell'angle-ply.

La prima analisi ha considerato l'interfaccia sottoposta ad un carico di 1000 N avente direzione assiale, si sono valutati gli spostamenti e, dall'equazione 3, si sono ricavati i valori della rigidità assiale riportati in tabella 19. Le figure 81 e 82 riportano in un grafico i risultati ottenuti, nella prima si è plottato lo spostamento assiale funzione dell'orientazione delle fibre, nella seconda invece si mostra la variazione di rigidità in funzione dell'orientazione dell'angle-ply.

All'analisi della sollecitazione assiale è seguito lo studio del comportamento a flessione, la tabella 20 riporta le disposizioni delle fibre dell'angle-ply, le rotazioni della struttura espresse in radianti e le corrispondenti rigidità, calcolate dall'equazione 4, in seguito all'applicazione di una sollecitazione di flessione di intensità unitaria (1Nm). Si riportano la variazione dell'angolo di flessione (figura 83) e la corrispondente variazione di rigidità (figura 84) in funzione della differente orientazione delle fibre dell'angle-ply.

Disposizione delle fibre [gradi]	Rotazione attorno All'asse di flessione [rad]	Rigidità flessionale Calcolata [Nm/rad]
0°/0°	4.69×10^{-7}	2.132×10^6
0°/10°	5.96×10^{-7}	1.678×10^6
0°/20°	7.17×10^{-7}	1.395×10^6
0°/30°	7.36×10^{-7}	1.359×10^6
0°/45°	7.68×10^{-7}	1.302×10^6
0°/60°	7.80×10^{-7}	1.282×10^6
0°/70°	7.84×10^{-7}	1.276×10^6
0°/80°	7.86×10^{-7}	1.272×10^6
0°/90°	7.87×10^{-7}	1.271×10^6

Tabella 20: Rotazioni e rigidità flessionali calcolate dall'equazione 4 per differenti orientazioni delle fibre dell'angle-ply nella soluzione italiana.

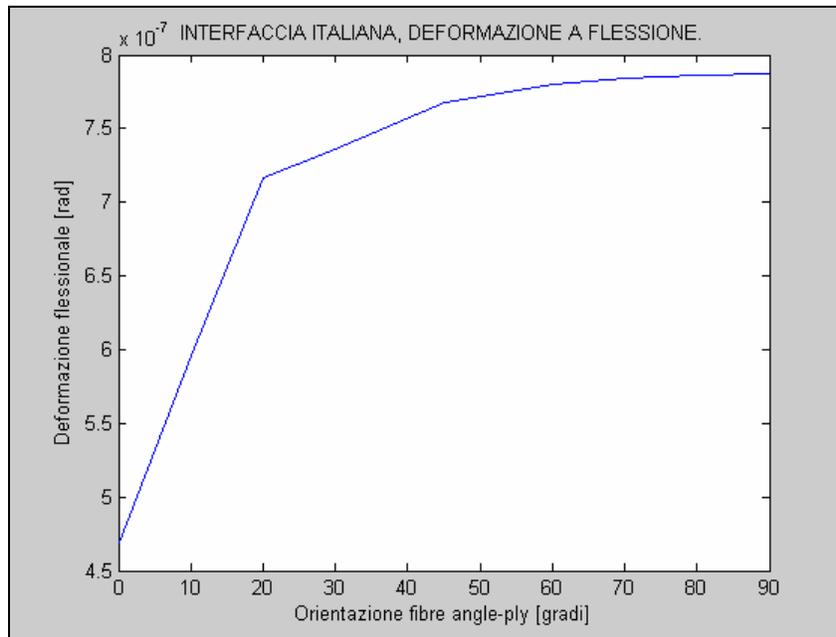


Figura 82: Soluzione italiana, deformazioni flessionali in funzione delle differenti orientazioni dell'angle-ply.

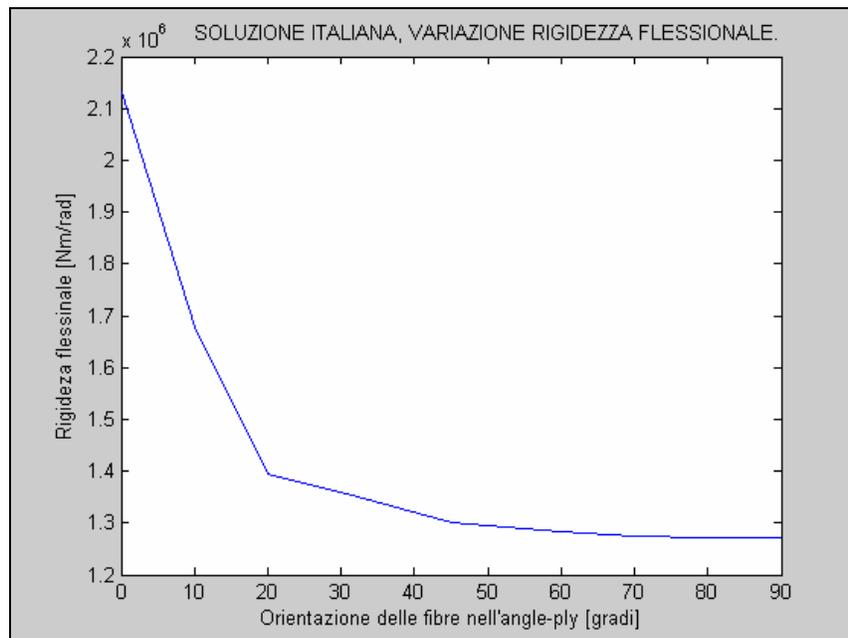


Figura 83: Variazione rigidità flessionale in funzione della differente orientazione delle fibre dell'angle-ply, i dati sono quelli di tabella 15 e sono riferite alla soluzione italiana.

In tabella 21 sono riportati in funzione della diversa disposizione delle fibre dell'angle-ply i valori delle rotazioni dell'interfaccia italiana in radianti e le rigidezze torsionali date dall'equazione 5. In accordo con quanto fatto in precedenza per le altre analisi, sono stati plottati i vari risultati ottenuti, le figure di riferimento in questo caso sono la 85 e la 86.

Disposizione delle fibre [gradi]	Rotazione attorno All'asse di torsione [rad]	Rigidezza torsionale Calcolata [Nm/rad]
0°/0°	6.220×10^{-4}	1.608×10^5
0°/10°	6.164×10^{-4}	1.622×10^5
0°/20°	6.028×10^{-4}	1.659×10^5
0°/30°	5.574×10^{-4}	1.794×10^5
0°/45°	5.109×10^{-4}	1.957×10^5
0°/60°	4.386×10^{-4}	2.280×10^5
0°/70°	4.011×10^{-4}	2.493×10^5
0°/80°	3.749×10^{-4}	2.667×10^5
0°/90°	3.620×10^{-4}	2.762×10^5

Tabella 21: Rotazioni e rigidezze torsionali calcolate dall'equazione 5 per differenti orientazioni delle fibre dell'angle-ply nella soluzione italiana.

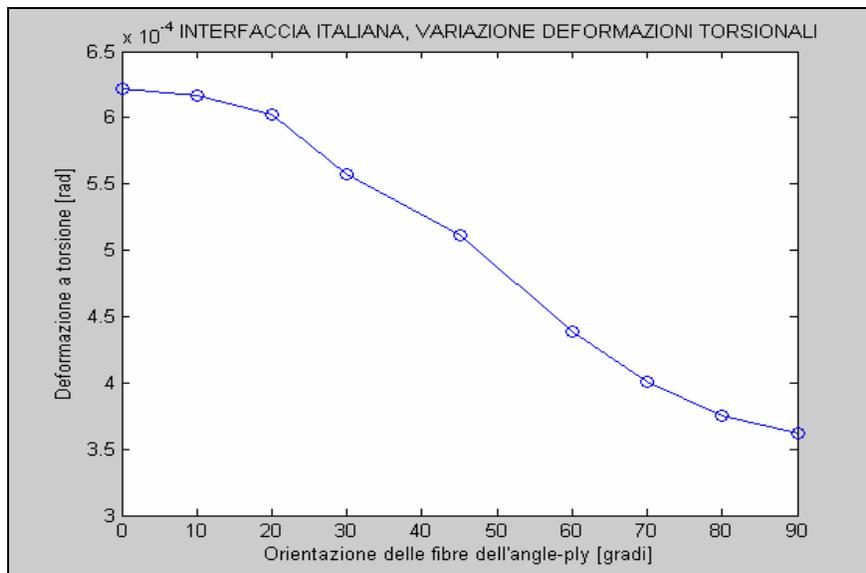


Figura 84: Soluzione italiana, deformazioni torsionali in funzione delle differenti orientazioni dell'angle-ply, è stato applicato un momento torcente di 1Nm all'estremo libero dell'interfaccia.

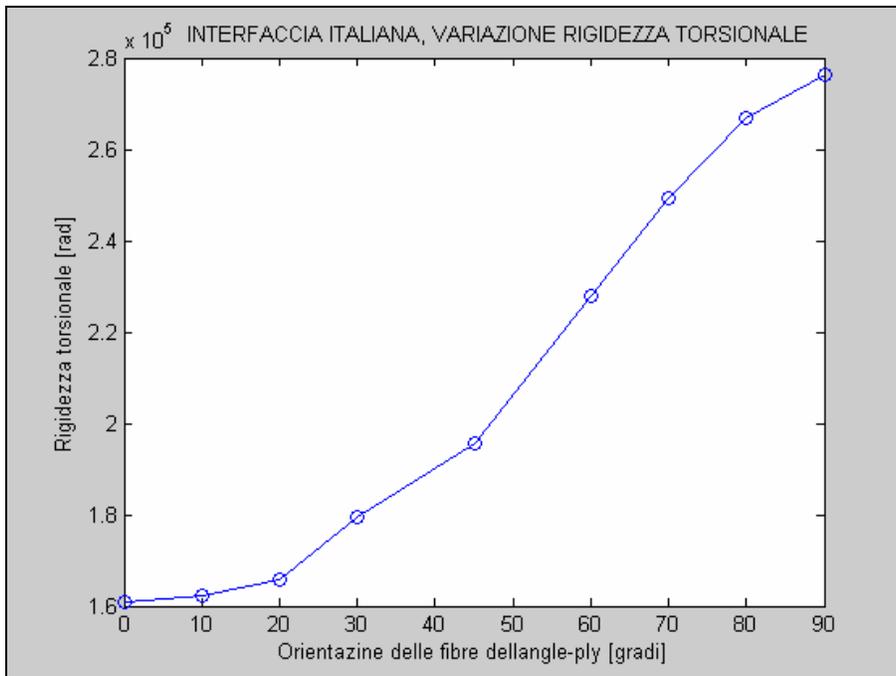


Figura 85: Variazione rigidità torsionale in funzione della differente orientazione delle fibre dell'angle-ply, i dati sono quelli di tabella 21 e sono riferite alla soluzione italiana.

6.5 Analisi comparata dei risultati

Scopo della comparazione è quello di valutare quale tra le due soluzioni è più rigida a parità di massa attraversata, prima di passare al confronto è quindi necessario valutare quale è la perdita di radiazione a cui si va incontro introducendo una delle due strutture all'interno dell'esperimento. I conteggi eseguiti sulla soluzione americana hanno fornito un perdita complessiva di lunghezza di radiazione pari a $4.00 \cdot 10^{-3}$, lo stesso valore numerico è stato assunto per la soluzione italiana. Il calcolo per esteso e riferito ad i singoli materiali è riportato tabelle 22 e 23, la prima è per la soluzione americana la seconda è l'interfaccia italiana.

I valori in rosso sono quelli della struttura complessiva e, come detto poc'anzi sono molto simili, questo vuol dire che dal punto di vista fisico le due soluzioni sono pressappoco uguali. I

valori tabulati non tengono conto della lunghezza di radiazione degli straws dal momento che sono presenti nello stesso numero e in identica posizione in entrambe le due soluzioni.

Spessore pelli di pre-preg	0.05 cm (x2)
Massa attraversata	0.168 g\cm ²
Densità	1.68 g\cm ³
Lunghezza di radiazione	4.00*10 ⁻³

Tabella 22: Calcolo, relativo alla soluzione USA, delle lunghezza di radiazione.

	Spessore Costituenti	Densità (g\cm ³)	Massa attraversata (g\cm ²)	Lunghezza di radiazione
Pre-preg	0.0250 cm (x2)	1.68	0.0840	1.997*10 ⁻³
Rohacell	1.324 cm (x2)	0.032	0.0847	2.050*10 ⁻³
Colla	30 μm	1.42	0.0090	2.17*10 ⁻⁴
Sandwich Tot.	(senza straws) 2.70 cm (con straws) 3.8 cm		0.1777	4.264*10 ⁻³

Tabella 23: Calcolo della lunghezza di radiazione per la soluzione italiana.

Nel grafico riportato in figura 87, si sono confrontati gli spostamenti in direzione assiale delle due soluzioni, i valori sono gli stessi ritrovati in precedenza, si guardino le tabelle 16 e 19. Il confronto eseguito per la rigidità assiale è stato ripetuto anche per la rigidità flessionale, il grafico relativo è riportato in figura 88 e le tabelle di riferimento per i dati sono la 17 per la soluzione americana e la 20 per l'interfaccia italiana. In figura 89 si confronta la rigidità torsionale, per i dati numerici si guardino le tabelle 18 e 21 per la soluzione americana ed italiana rispettivamente.

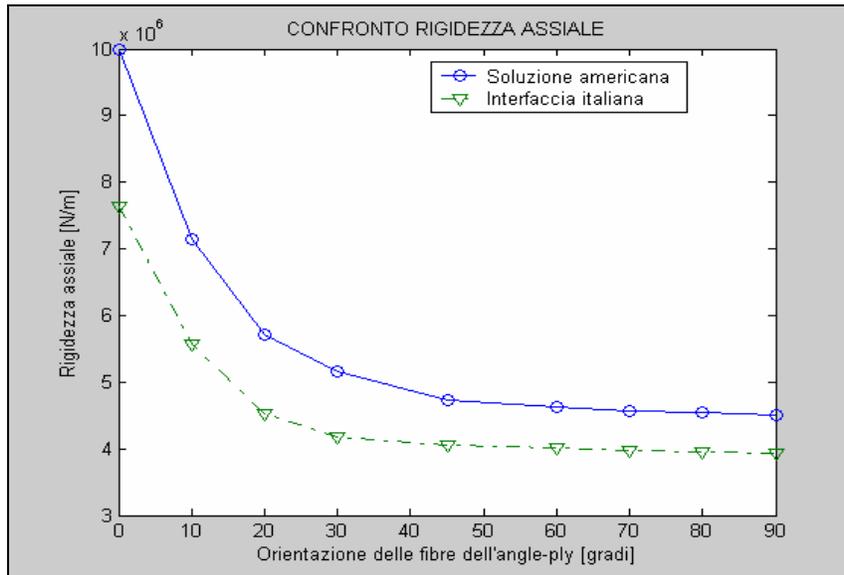


Figura 86: Nel grafico sono riportati le rigidezze assiali delle due soluzioni, i gradi in ascissa sono relativi alla disposizione di un solo pre-preg per l'interfaccia italiana e due pelli di pre-preg per la soluzione americana, in questo secondo caso si leggano $0^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 40^\circ, \pm 60^\circ, \pm 80^\circ, \pm 90^\circ$.

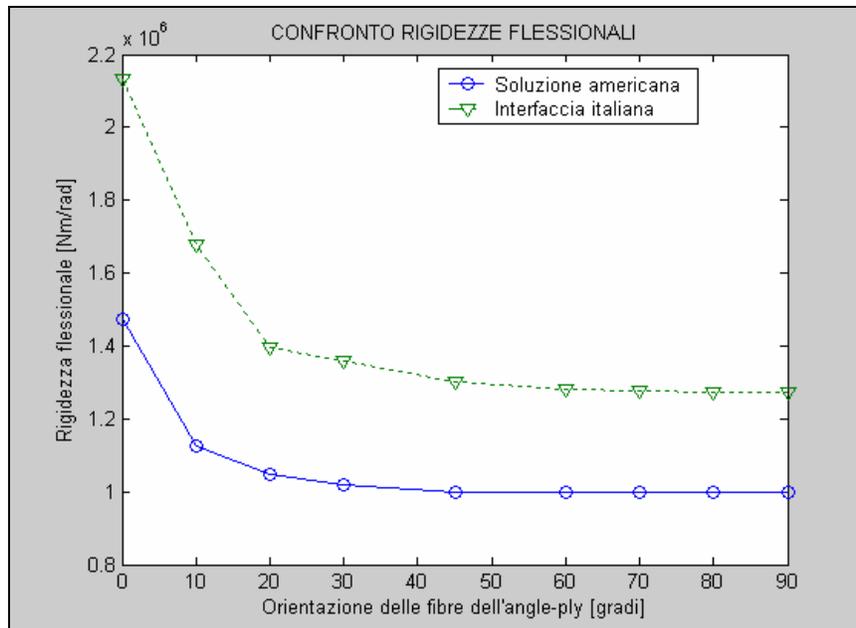


Figura 87: Nel grafico sono riportati le rigidezze flessionali delle due soluzioni, i gradi in ascissa sono relativi alla disposizione di un solo pre-preg per l'interfaccia italiana e due pelli di pre-preg per la soluzione americana, in questo secondo caso si leggano $0^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 40^\circ, \pm 60^\circ, \pm 80^\circ, \pm 90^\circ$.

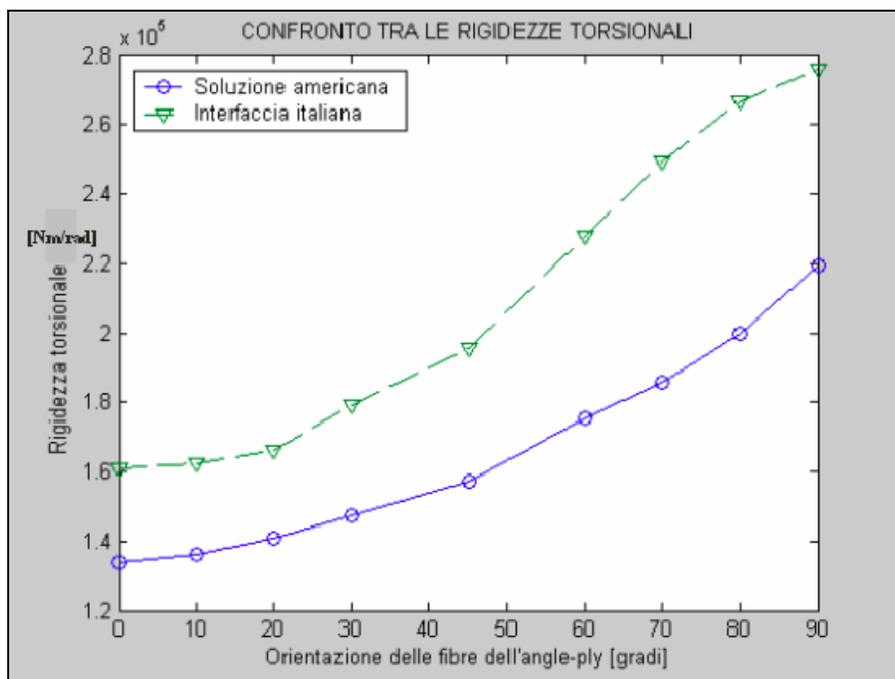


Figura 88: Nel grafico sono riportati le rigidzze torsionali delle due soluzioni, i gradi in ascissa sono relativi alla disposizione di un solo pre-preg per l'interfaccia italiana e due pelli di pre-preg per la soluzione americana, in questo secondo caso si leggano 0°, ±10°, ±20°, ±40°, ±60°, ±80°, ±90°.

Dallo studio comparato delle due soluzioni si evince una rigidzza assiale maggiore, confermata da un minor spostamento in tale direzione, della soluzione statunitense, il dato non stupisce dal momento che, come già rilevato in seguito, si hanno due pelli di composito in più rispetto alla soluzione italiana. L'analisi invece delle rigidzze flessionali conferma, invece, come l'interfaccia progettata in Italia risulta avere un comportamento più rigido. Questo è spiegabile perché è una struttura composita, e caratterizzata da maggior rigidzza flessionale. Il motivo per cui il supporto per straws italiano presenta anche una maggior rigidzza in senso torsionale è, invece, da attribuirsi al fatto che essa presenta un'unica pelle che avvolge l'espanso e non due come avviene nelle strutture sandwich tradizionali, si ha quindi una distribuzione di sforzo migliore sulla sezione.

L'aver maggiore rigidità in seguito all'applicazione di carichi flessionali e torsionali è un aspetto importante della struttura, è principalmente in queste direzioni che è sollecitato il sistema meccanico in condizioni di servizio, l'interfaccia, così come è stata concepita in Italia permette di avere delle rotazioni minori della sensoristica ad essa applicata.

6.6 Supporto esterno

Il supporto esterno è realizzato come supporto per l'interfaccia e dei sensori e apparecchiature ad essa collegate. Le caratteristiche richieste a questo componente sono una buona rigidità ed amagneticità, non è invece necessaria una buona trasparenza alle radiazioni dal momento che questa parte non è attraversata dal fascio di particelle. Per soddisfare le specifiche richieste, si è realizzato il componente in materiale metallico non in grado di generare campi magnetici, in particolare si è usata una lega di alluminio conosciuta con il nome commerciale di Anticorodal³⁸ caratterizzata come l'alluminio da un reticolo cubico facce centrate e quindi in grado di soddisfare la specifica richiesta. La necessità di avere dei componenti amagnetici, come già sottolineato, deriva dal bisogno di non deviare le particelle ed in generale di non interagire con esse.

Aspetto interessante da sottolineare e che la forma particolare della sezione del supporto, di seguito descritta, è dettata da esigenze costruttive, nelle cavità praticate si vanno ad alloggiare l'elettronica dei sensori e gli impianti di refrigerazione. Entrambe le due apparecchiature sono particolarmente importanti, la prima permette l'acquisizione dei dati rilevati dalla sensoristica mentre i dispositivi per la refrigerazione sono necessari ad assicurare una buona stabilità termica in fase operativa. Quando l'elettronica è in funzione, infatti, produce riscaldamenti localizzati dovuti

³⁸ Per informazioni su questa lega e sulle sue caratteristiche e proprietà meccaniche si consulti il capitolo 3 dedicato ai materiali utilizzati.

all'effetto Joule dei conduttori. L'impianto di raffreddamento deve essere in grado di smaltire eventuali gradienti generatisi nella struttura, particolarmente dannosi sono i riscaldamenti localizzati in quanto in grado di introdurre distorsioni di grande entità in ridotte sezioni del componente. La sezione del supporto è mostrata in figura 90, le parti in verde sono quelle in lega di alluminio, le altre sono invece gli impianti.

Oltre ai dispositivi di cui si è fatto cenno in precedenza il supporto deve alloggiare anche i componenti per il tensionamento degli straws, da caricare assialmente dai due opposti estremi della struttura.

Il numero dei frames è pari a 7 con dimensioni variabili secondo quanto riportato in tabella 15.

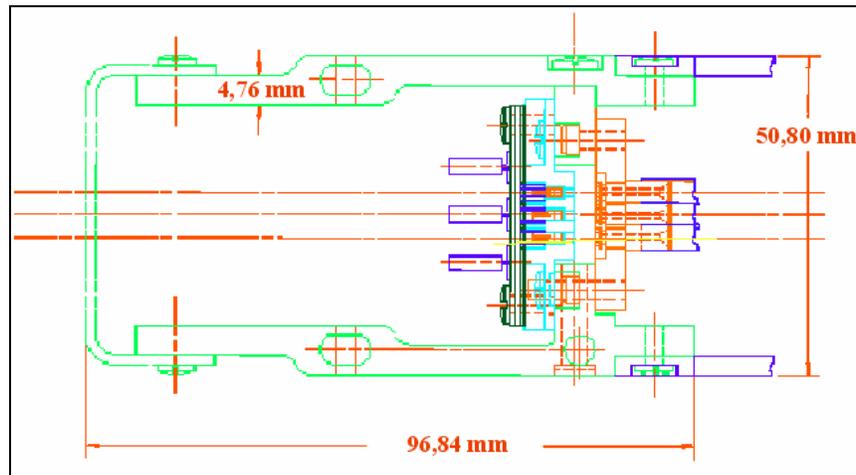


Figura 89: Sezione del supporto esterno completo dell'elettronica e della componentistica degli impianti di refrigerazione necessari per evitare dei surriscaldamenti specie localizzati della struttura esterna dovuti al funzionamento della sensoristica durante la fase di acquisizione dati.

Secondo lo schema progettuale, tale struttura dovrebbe essere vincolata nella parte a contatto con il suolo, dovendosi realizzare un confronto tra le due soluzioni, si sono vincolate i due frames nello stesso modo, non attenendosi ai vincoli dettati dal progetto preliminare. In accordo a quanto

fatto dalla collaborazione statunitense, come riferimento si è considerata la quinta stazione.

6.6.1 Struttura del supporto esterno

La figura 91 riporta la sezione eseguita per la simulazione al FEM, rispecchia in modo fedele quella reale. In figura 92 è stata riportata parte della sezione a contatto con il transetto (riportato in figura 93). Di seguito sono riportate parti delle sezione secondo i progetti realizzativi originali, le quote introdotte sono in millimetri, l'intera struttura è ottenuta per estrusione.

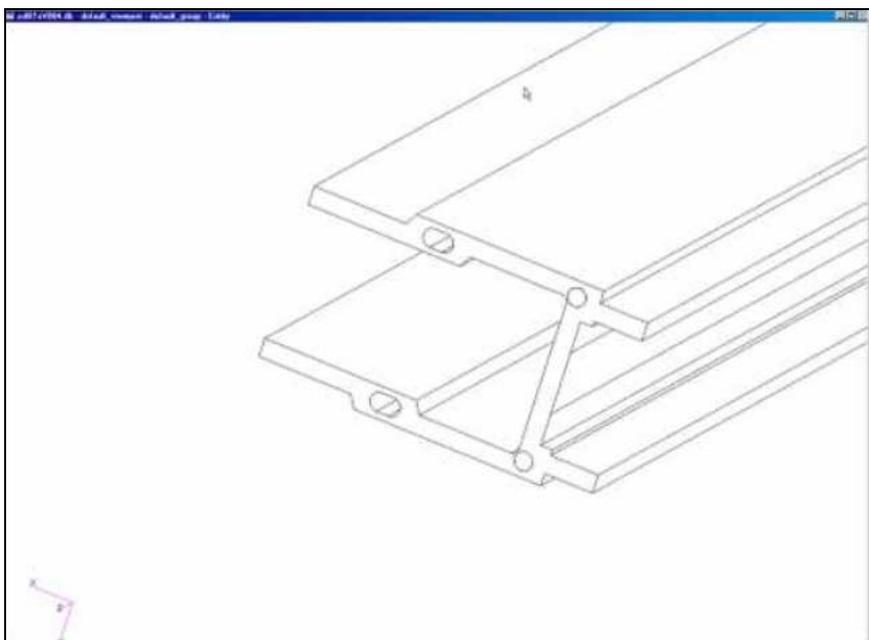


Figura 90: Riproduzione sull'interfaccia Patran r3 della sezione del supporto la dimensione longitudinale alla sezione aumenta passando dal primo all'ultimo frame. E' da sottolineare come questa sezione rimane immutata per le due stazioni prese in esame.

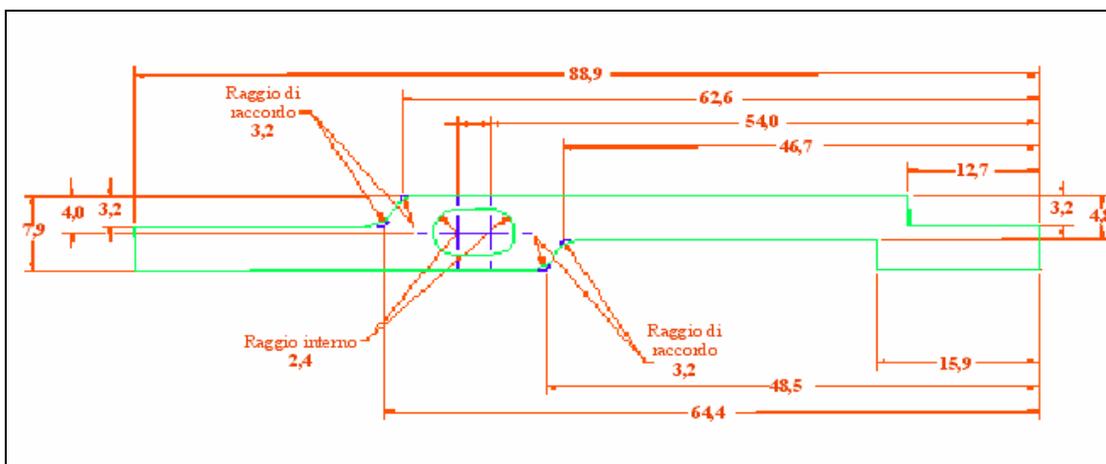


Figura 91: : Misure in millimetri di parte della sezione del frame, queste dimensioni sono uguali per tutti e sette gli stadi dell'esperimento per cui l'ultima stazione risulterà molto meno rigida delle prime.

Essendo realizzata per estrusione la sezione del supporto rimane costante per l'intera lunghezza del supporto, tuttavia, alle due estremità, si sono introdotte delle sezioni modificate ottenute per successiva fresatura del componente, questo permette di avere un più agevole montaggio della struttura e il possibile inserimento di un supporto a ridosso della mezzeria. In figura 94 si è riportata la riproduzione al FEM di questa parte, la sua lunghezza è pari a 32,2 mm.

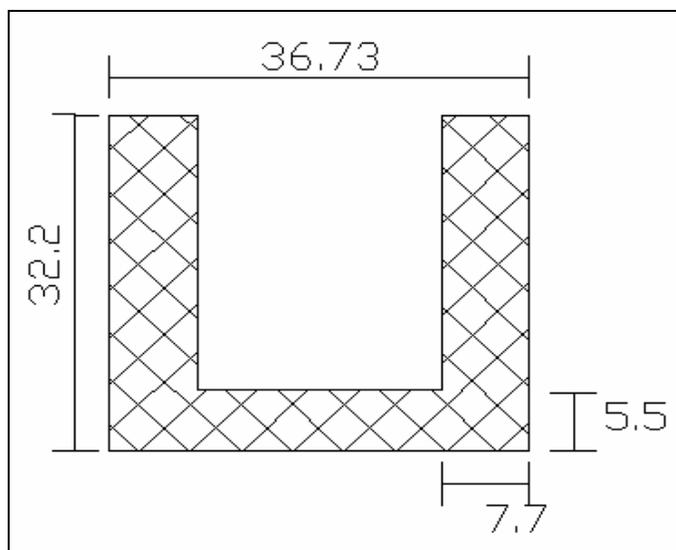


Figura 92: Disegno fatto con AutoCad relativo alla sezione del transetto, le quote sono in millimetri.

Sempre per estrusione ma con orifizio più semplice si è realizzato la parte del transetto. In questa zona del supporto non sono posizionati dispositivi particolari essendo posti in parallelo alla direzione dei rivelatori.

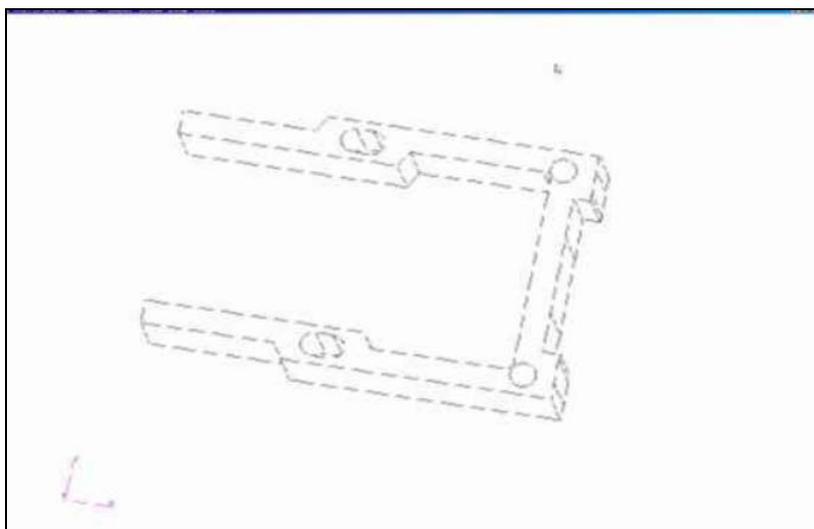


Figura 93: Riproduzione sull'interfaccia Patran r3 della sezione del supporto nella parte a contatto con il transetto esterno essa ha una dimensione longitudinale di 32,2 mm.

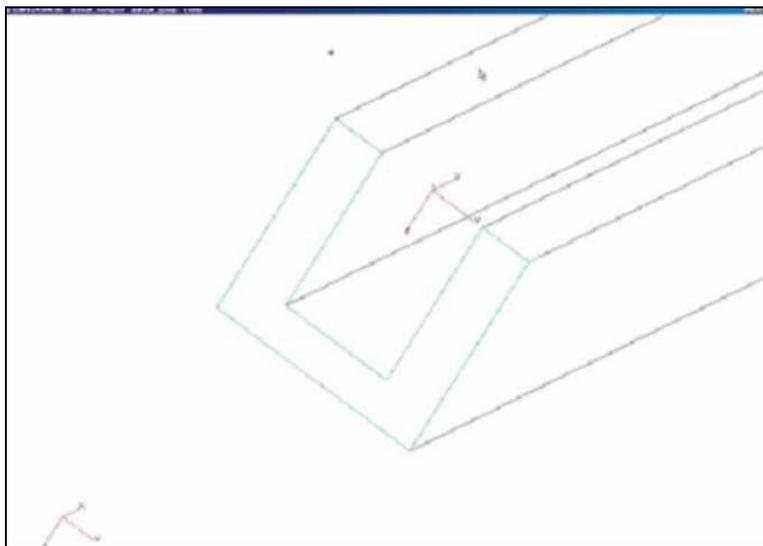


Figura 94: Riproduzione sull'interfaccia Patran r3 della parte del transetto, si può notare una sezione molto semplice dovuta all'assenza in questo tratto dell'elettronica, dei dispositivi per il tensionamento degli straws e degli impianti di refrigerazione presenti invece nelle altre parti del frame.

6.6.2 Raccordi

Sono anch'essi realizzati in Anticorodal secondo lo schema costruttivo di riferimento riportato in figura 96, queste parti sono fissate al supporto con bullonature poste su ambo i lati del raccordo in modo da essere vincolate alla parte del transetto ed ad uno dei bracci laterali. I fori per alloggiare hanno un diametro di 3.5 mm, per favorire inoltre il corretto posizionamento ed assicurare un buon contatto tra le parti, nel supporto si sono praticati degli svassi con fresature in modo da impedire eventuali movimenti della struttura.

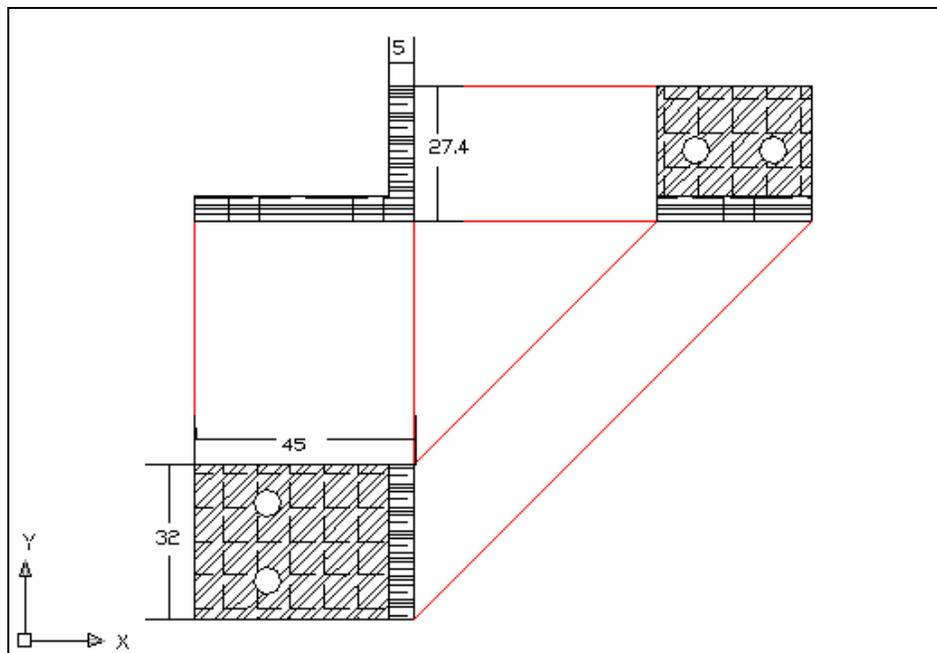


Figura 95: Rappresentazione AutoCad dei raccordi usati, le quote introdotte, ritenute più importanti ai fini progettuali, sono in mm.

6.6.3 Carichi e materiali

Sul supporto esterno vanno tensionati gli straws, in tabella 24 sono riportate le dimensioni della stazione, il numero degli straws, tra parentesi il numero di gruppi³⁹, ed il corrispondente carico generato espresso in Newton. Come si può facilmente notare se si aumentano le dimensioni della stazione aumenta il corrispondente numero di carichi dovuto ai sensori applicati. Le forze applicate sono dovute al tensionamento degli straw tubes, il carico necessario per il tensionamento di un sensore è complessivamente di 0,2 kg, la direzione di applicazione è trasversale alla sezione con verso rivolto alla parte interna.

Numero di stazione	Semi-lunghezza Trasversale [mm]	Numero di straws Per stazione (gruppi)	Carico Complessivamente Introdotto per lato [N]
1	329.40	450 (10)	882,9
2	461.10	540 (12)	1059,5
3	681.80	900 (20)	1765,8
4	964.40	1260 (28)	2472,1
5	1105.70	1440 (32)	2825,3
6	1247.00	1620 (36)	3178,4
7	2094.71	2700 (60)	5297,4

Tabella 24: Straws presenti per singola stazione con corrispondente carico da applicare per il tensionamento, il valore riportato è stato ottenuto sommando i moduli dei carichi applicati per ogni singolo lato del frame.

Quello che si può prevedere, dato l'aumento delle dimensioni del supporto e dal momento che la sezione rimane invariata, è una forte diminuzione della rigidezza passando dalla prima alla settima stazione. Si supporranno i carichi essere applicati in direzione perpendicolare alle due estremità ed aventi verso opposto, si considerano inoltre essere di costante intensità, sollecitazioni statiche.

³⁹ Ogni gruppo di straws è costituito da 45 sensori raccolti insieme e disposti su 3 file da 15 l'una, ha un ingombro complessivo di 68,81 mm.

I materiali usati sono: composito con matrice epossidica e fibra lunga di carbonio disposti su due strati per la soluzione italiana e quattro in quella americana, rohacell IG come espanso ed alluminio 6061 per il supporto.

6.6.4 Descrizione del modello agli elementi finiti

Il modello riprodotto al FEM è realizzato usando elementi solidi per la realizzazione del supporto ed elementi bidimensionali e 3-D accoppiati per la realizzazione dell'interfaccia, in accordo a quanto visto in precedenza nella sezione delle analisi elementari. Con gli elementi solidi si è riuscito ad avere una buona corrispondenza geometrica con il progetto reale, si sono rese tuttavia necessarie delle semplificazioni sia per la riproduzione dei componenti sia per l'applicazione dei carichi per alleggerire l'implementazione al processore resa pesante dal numero e dalle dimensioni delle strutture. Si ritiene, tuttavia, che il modello riprodotto al FEM ha una buona corrispondenza con quello reale.

Una mesh bidimensionale di tipo preliminare è stata eseguita sulla base del frame, gli elementi generati sono stati utilizzati per eseguire uno "sweep"⁴⁰ e produrre degli elementi 3-D, gli Hexa, visibili in figura 97. Il vantaggio nell'impiego di questi elementi è quello di avere un margine di errore minore rispetto ai Tet ed agli altri 3-D, come svantaggio è legato all'obbligo di utilizzarli solo per superfici aventi sezione di base costante e non presentante cavità trasversali alla direzione di estrusione della mesh. Dal momento che i componenti del supporto sono prodotti per estrusione, l'impiego di questi elementi di fatto non ha costituito un problema, si sono tuttavia dovuti eliminare

⁴⁰ Il termine italiano corrispondente è estrusione, questo processo consente di sviluppare degli elementi solidi di forma prismatica con base data dagli elementi bidimensionali generati nella preliminare mesh ed altezza regolabile manualmente.

gli svassi ottenuti per fresatura, i raccordi e i fori trasversali su cui andare a posizionare i pacchetti degli straws. Nella simulazione virtuale si è schematizzata solo una metà dell'intera struttura del frame, questo ha permesso di alleggerire ulteriormente il modello e di accentuare l'entità del carico trasferito all'interfaccia, si potranno, in questo modo, meglio mettere in risalto le differenze tra le due strutture meccaniche.

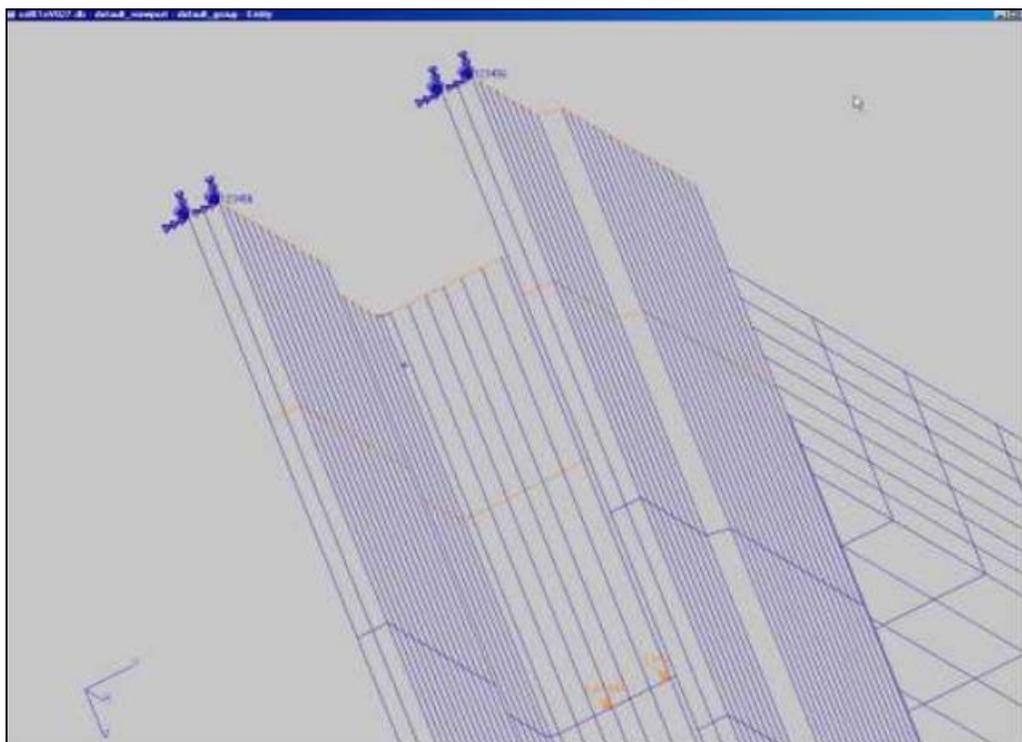


Figura 96: Riproduzione al FEM di parte del frame, il dettaglio permette di visualizzare la mesh, si notino gli elementi prodotti con sweep realizzati in azzurro, i loads rappresentati dalle frecce in arancione e gli incastrì, riprodotti in blu in alto.

Per quanto riguarda i carichi applicati dovuti agli straws, essi sono stati realizzati con forze trasversali aventi la stessa intensità e direzione ma verso opposto sulle due opposte estremità del frame. Secondo il modello al FEM, ogni carico applicato rappresenta l'azione di 15 straws allineati, per cui 3 forze, ognuna di 14.7 N, generano la tensione complessiva necessaria per tensionare un

singolo pacchetto di sensori. I carichi sono posizionati sui nodi, per avere un corretto posizionamento degli stessi si è reso necessario un controllo della dimensione degli elementi generati nella fase di estrusione, in particolare si è regolato il passo, ovvero l'altezza, facendo in modo da farla corrispondere con il punto in cui si sono poste le forze.

Dal momento che si vuole eseguire un confronto tra due soluzioni alternative, il tipo di vincolo realizzato non ha mirato a riprodurre la situazione reale. Il modello realizzato al FEM prevede l'introduzione di due incastri posti alle estremità della struttura dalla parte opposta alla zona dove si va a collocare l'interfaccia, in questo modo si genera un sistema di vincoli simmetrico in grado di permettere una più semplice interpretazione dei risultati. La stessa condizione di vincolo è stata impiegata per entrambe le due soluzioni, si è quindi passato all'analisi dei risultati, ed al confronto tra le rigidità delle due strutture.

6.7 Analisi dei risultati

6.7.1 Soluzione americana

Uno studio di tipo preliminare condotto ponendo un materiale isotropo ed omogeneo, modulo elastico $E=200$ GPa, ha permesso di avere un primo punto di riferimento per i successivi conteggi eseguiti utilizzando un angle-ply in composito. I risultati ottenuti ponendo questo materiale invece del composito sono stati riportati in tabella 25.

L'analisi condotta introducendo l'angle-ply in composito ha permesso di valutare quale tra le due interfacce ha una rigidità maggiore e quale è la disposizione dell'angle-ply in grado di conferire maggiore rigidità alla struttura. I risultati di seguito riportati hanno preso in

considerazione in un primo momento lo spostamento complessivo, quindi le sue componenti nei tre assi del sistema di riferimento ed infine le rotazioni attorno agli stessi.

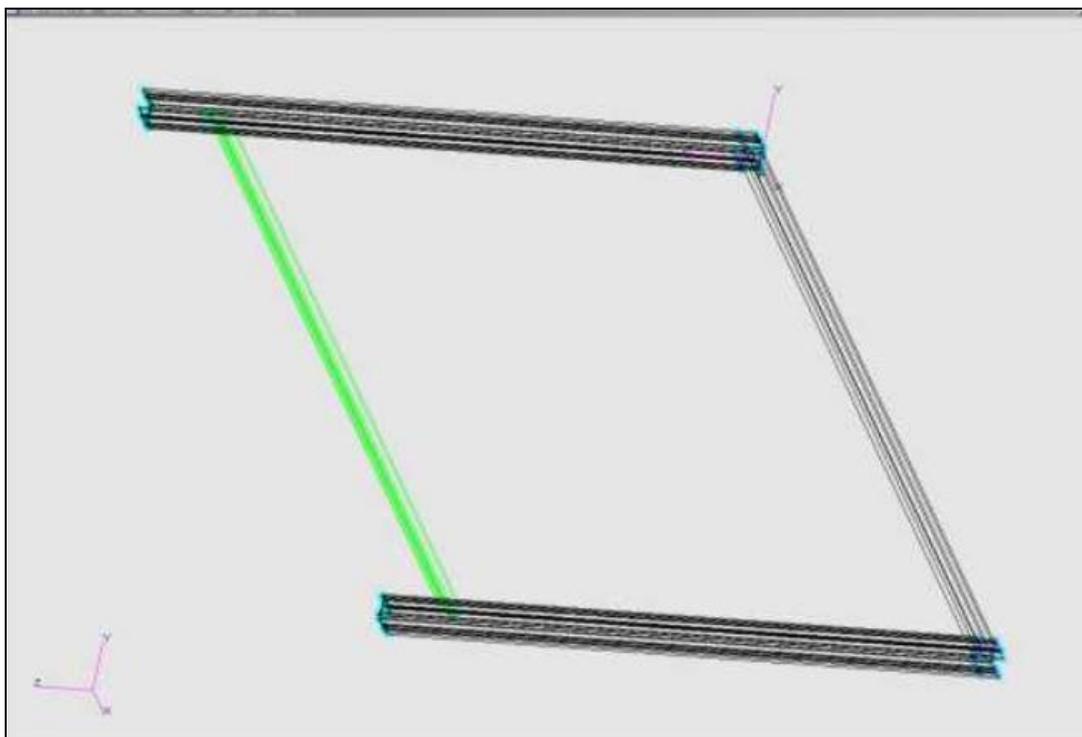


Figura 97: Modello agli elementi finiti della soluzione americana, rappresentata in verde.

Deformazione Complessiva [mm]	Deformazione lungo L'asse x [mm]	Deformazione lungo L'asse y [mm]	Deformazione lungo L'asse z [mm]
2.11	0.201	1.011	2.026
	Rotazione attorno L'asse x [rad]	Rotazione attorno L'asse y [rad]	Rotazione attorno L'asse z [rad]
	$6.771 \cdot 10^{-3}$	$6.450 \cdot 10^{-3}$	$5.901 \cdot 10^{-3}$

Tabella 25: Deformazioni e rotazioni attorno agli assi per la soluzione americana avendo utilizzato un materiale con modulo elastico di 200 GPa al posto del composito.

Come è possibile vedere in figura 98, l'asse x si sviluppa secondo l'asse dell'interfaccia, l'asse z è parallelo alla parte del supporto su cui si incastra il supporto per straws mentre l'asse y è perpendicolare a tale piano. Si sono prese in considerazione diverse orientazioni dell'angle-ply sia per la soluzione americana che per l'interfaccia italiana, gli angoli sono presi con direzione di riferimento data dall'applicazione dello sforzo, secondo quanto detto in precedenza, essa è orientata secondo l'asse x di figura 98. Nel caso della soluzione americana è stato possibile, dato il maggior numero di pelli, realizzare una distribuzione simmetrica delle fibre. I dati ottenuti sono riportati nelle tabelle 26÷29, mentre nei grafici dal 99 a 105 sono rappresentati i risultati.

Da sottolineare come, tra le varie verifiche effettuate, la distribuzione dei pre-preg esterni con direzione 0° rispetto alla direzione di sollecitazione è stata quella che ha dato i minori spostamenti, nei grafici e nelle tabelle a seguire sono riportati solo tali risultati.

Orientazione fibre del composito [gradi]	Spost. Totale [mm]	Deform. lungo asse x [mm]	Deform. Lungo asse y [mm]	Deform. lungo asse z [mm]	Modulo elastico Longitudinale [GPa]
0°/0°/0°/0°	3.07	0.237	1.178	2.869	232
0°/-10°/10°/0°	3.09	0.240	1.093	2.899	230
0°/-20°/20°/0°	3.36	0.251	1.119	3.172	220
0°/-30°/30°/0°	3.91	0.272	1.210	3.716	203
0°/-45°/45°/0°	4.30	0.295	1.285	4.314	187
0°/-60°/60°/0°	4.64	0.299	1.290	4.458	184
0°/-70°/70°/0°	4.69	0.300	1.320	4.497	184
0°/-80°/80°/0°	4.79	0.301	1.418	4.571	183
0°/90°/90°/0°	4.89	0.303	1.523	4.644	182

Tabella 26: Soluzione americana, deformazioni complessiva e lungo i tre assi. (Primo tipo di disposizione).

Orientazione fibre del composito [gradi]	Rotazione attorno asse x [rad]	Rotazione attorno asse y [rad]	Rotazione attorno asse z [rad]
0°/0°/0°/0°	3.615*10 ⁻²	9.921*10 ⁻³	9.364*10 ⁻³
0°/-10°/10°/0°	3.506*10 ⁻²	1.036*10 ⁻²	9.717*10 ⁻³
0°/-20°/20°/0°	2.969*10 ⁻²	1.194*10 ⁻²	1.107*10 ⁻²
0°/-30°/30°/0°	2.529*10 ⁻²	1.289*10 ⁻²	1.181*10 ⁻²
0°/-45°/45°/0°	1.910*10 ⁻²	1.368*10 ⁻²	1.281*10 ⁻²
0°/-60°/60°/0°	1.557*10 ⁻²	1.407*10 ⁻²	1.312*10 ⁻²
0°/-70°/70°/0°	1.497*10 ⁻²	1.410*10 ⁻²	1.318*10 ⁻²
0°/-80°/80°/0°	1.564*10 ⁻²	1.416*10 ⁻²	1.304*10 ⁻²
0°/90°/90°/0°	1.650*10 ⁻²	1.425*10 ⁻²	9.314*10 ⁻³

Tabella 27: Soluzione americana rotazioni lungo i tre assi.

Orientazione fibre del composito [gradi]	Spst. Totale [mm]	Deform. lungo asse x [mm]	Deform. Lungo asse y [mm]	Deform. lungo asse z [mm]	Modulo elastico Longitudinale [GPa]
90°/0°/0°/90°	4.89	0.303	1.523	4.644	182
90°/-10°/10°/90°	5.03	0.311	1.478	4.811	177
90°/-20°/20°/90°	5.79	0.343	1.566	5.576	160
90°/-30°/30°/90°	7.68	0.434	1.913	7.440	127
90°/-45°/45°/90°	14.9	0.841	3.099	14.588	65.5
90°/-60°/60°/90°	30.1	1.673	4.981	29.637	33.0
90°/-70°/70°/90°	39.0	2.153	5.972	38.422	25.6
90°/-80°/80°/90°	42.3	2.329	6.727	41.740	23.7
90°/90°/90°/90°	43.0	2.358	7.295	42.401	23.4

Tabella 28: Soluzione americana, deformazioni complessiva e lungo i tre assi. (Secondo tipo di disposizione).

Orientazione fibre del composito [gradi]	Rotazione attorno asse x [rad]	Rotazione attorno asse y [rad]	Rotazione attorno asse z [rad]
90°/0°/0°/90°	1.650*10 ⁻²	1.425*10 ⁻²	1.314*10 ⁻²
90°/-10°/10°/90°	1.580*10 ⁻²	1.413*10 ⁻²	1.365*10 ⁻²
90°/-20°/20°/90°	1.554*10 ⁻²	1.397*10 ⁻²	1.534*10 ⁻²
90°/-30°/30°/90°	1.691*10 ⁻²	1.378*10 ⁻²	2.138*10 ⁻²
90°/-45°/45°/90°	2.216*10 ⁻²	1.357*10 ⁻²	4.102*10 ⁻²
90°/-60°/60°/90°	3.337*10 ⁻²	1.308*10 ⁻²	7.770*10 ⁻²
90°/-70°/70°/90°	3.848*10 ⁻²	1.206*10 ⁻²	9.470*10 ⁻²
90°/-80°/80°/90°	4.196*10 ⁻²	1.120*10 ⁻²	9.741*10 ⁻²
90°/90°/90°/90°	4.450*10 ⁻²	1.100*10 ⁻²	9.721*10 ⁻³

Tabella 29: Soluzione americana, rotazioni attorno ai tre assi. (Secondo tipo di disposizione).

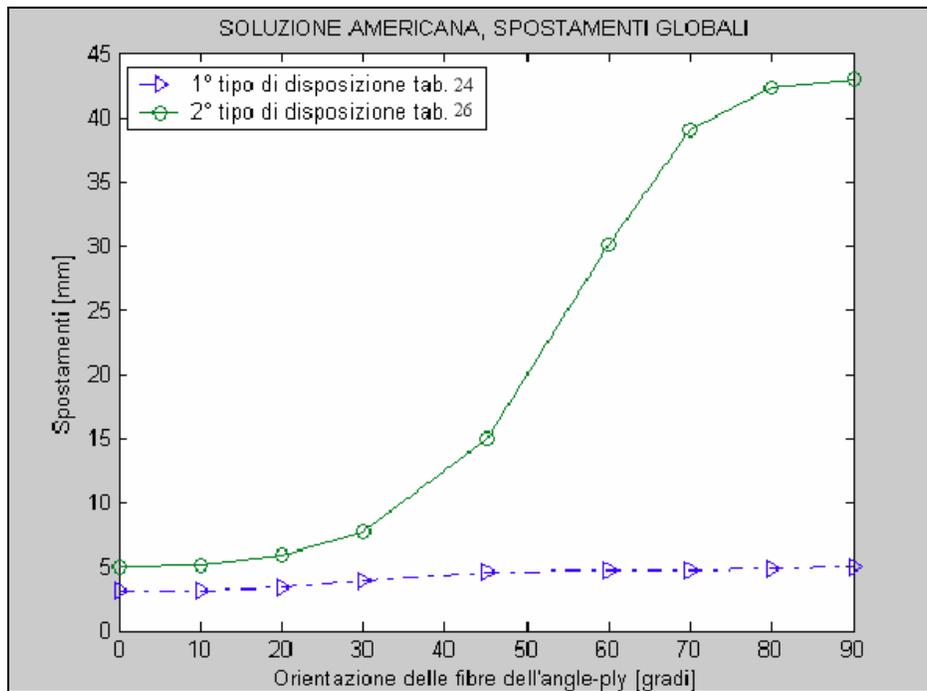


Figura 98: Soluzione americana. Deformazioni totali in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

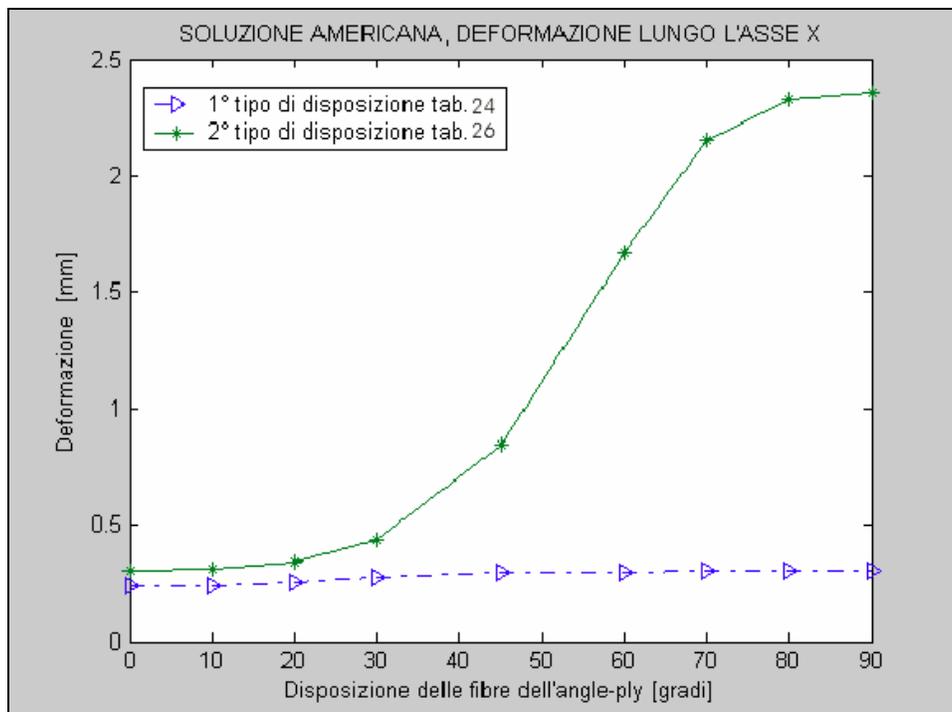


Figura 99: Soluzione americana. Deformazioni lungo l'asse x in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

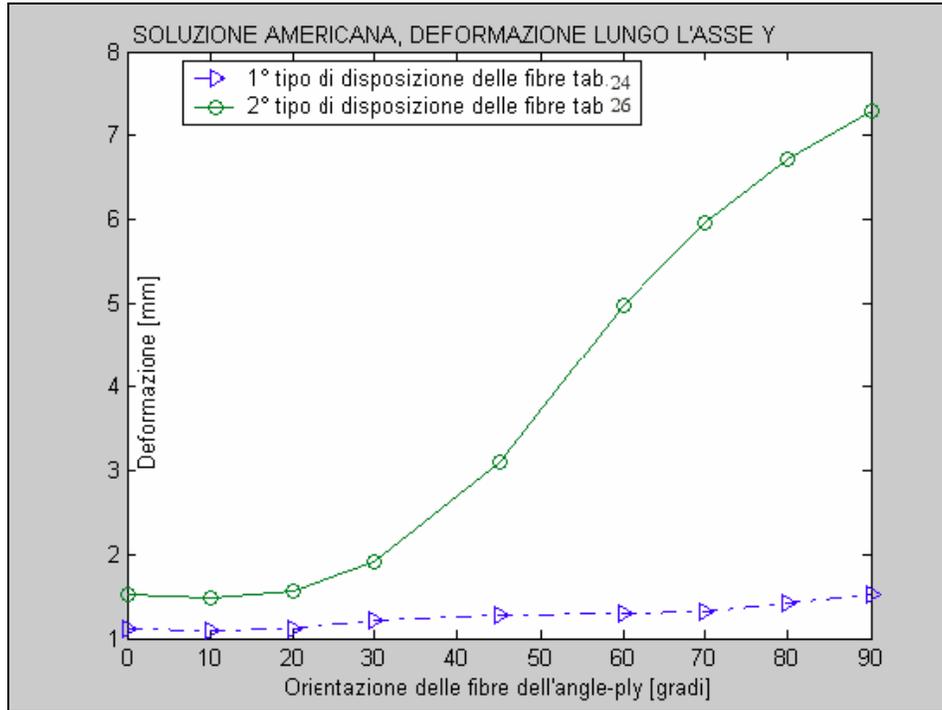


Figura 100: Soluzione americana. Deformazioni lungo l'asse y in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

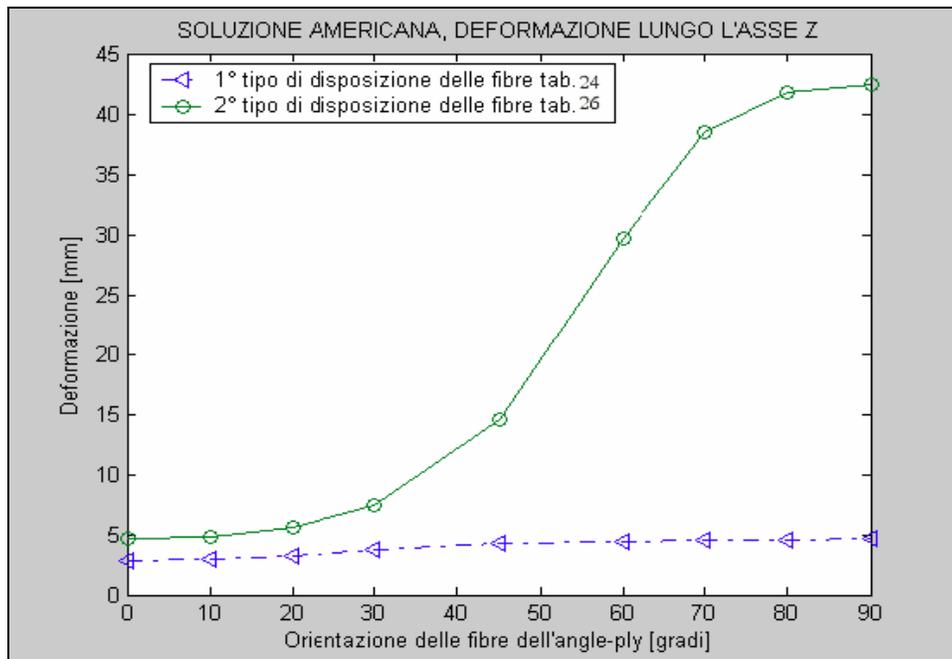


Figura 101: Soluzione americana. Deformazioni lungo l'asse z in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

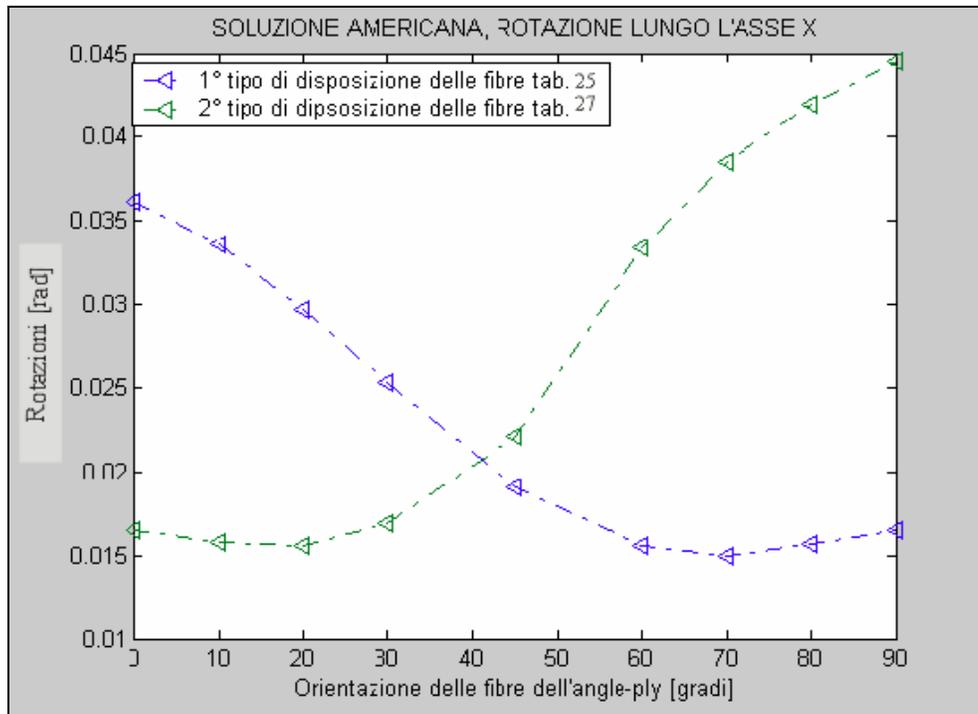


Figura 102: Soluzione americana. Rotazioni attorno all'asse x in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

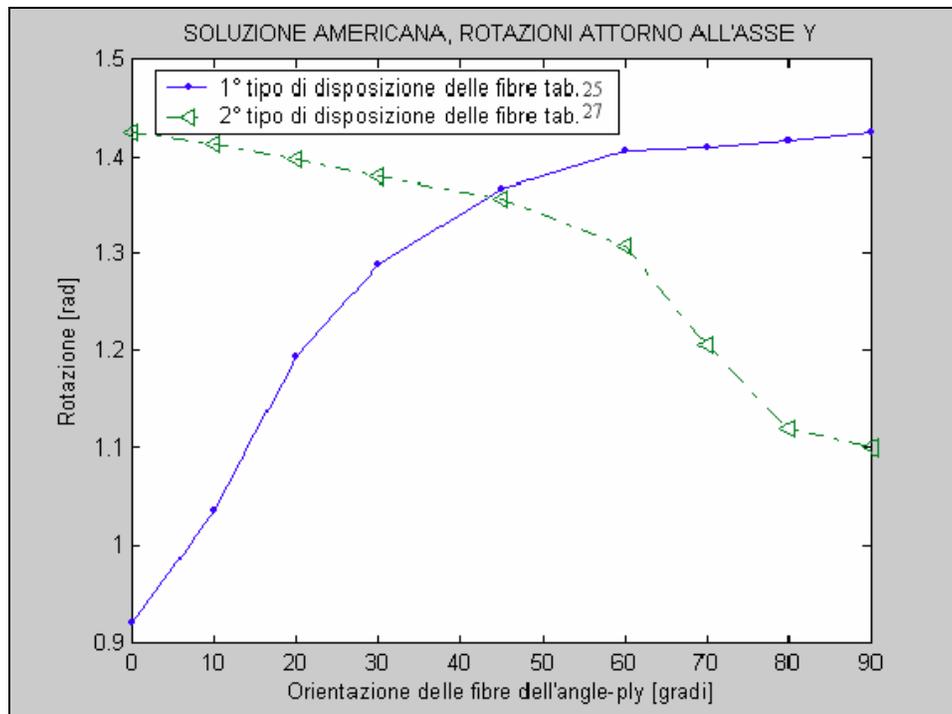


Figura 103: Soluzione americana. Rotazioni attorno all'asse y in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

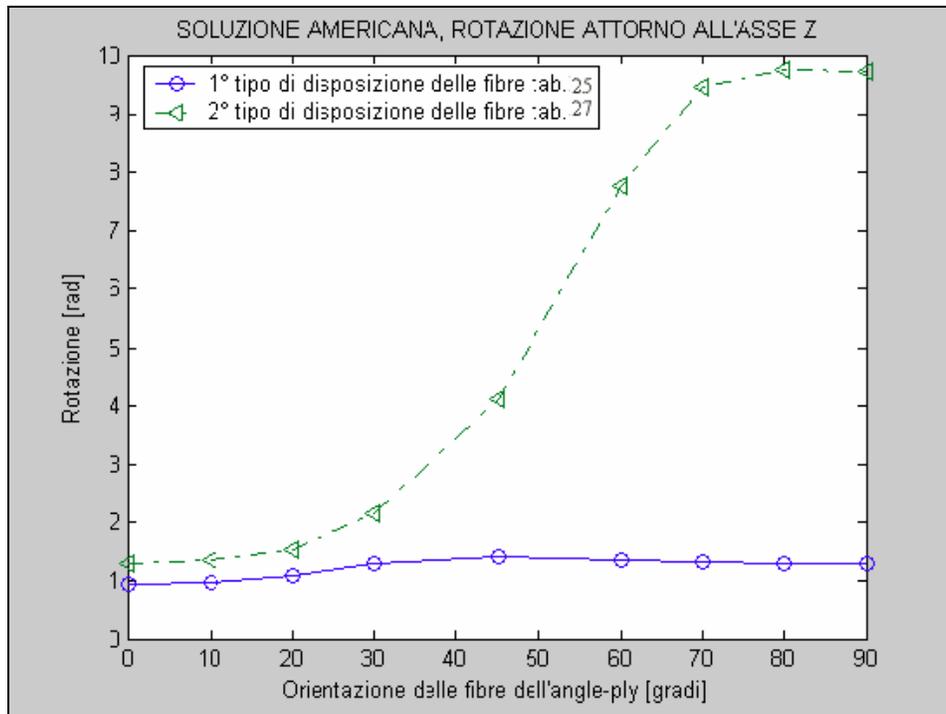


Figura 104: Soluzione americana. Rotazioni attorno all'asse z in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

6.7.2 Soluzione italiana

Deformazione Complessiva [mm]	Deformazione lungo L'asse x [mm]	Deformazione lungo L'asse y [mm]	Deformazione lungo L'asse z [mm]
1.28	0.305	$1.21 \cdot 10^{-1}$	1.278
	Rotazione attorno L'asse x [rad]	Rotazione attorno L'asse y [rad]	Rotazione attorno L'asse z [rad]
	$2.60 \cdot 10^{-3}$	$2.919 \cdot 10^{-3}$	$5.945 \cdot 10^{-4}$

Tabella 26: Deformazioni e rotazioni attorno agli assi per la soluzione americana avendo utilizzato un materiale con modulo elastico di 200 GPa al posto del composito.

In modo analogo a quanto fatto per la soluzione americana è stata studiata l'interfaccia italiana, anche in questo caso è stata eseguita un'analisi preliminare impiegando per il supporto per straws un materiale omogeneo ed isotropo di modulo elastico 200 GPa.

In tabelle 27-30 sono riportati, invece, i risultati relativi al materiale composito impiegato, anche in questo caso l'orientazione che ha permesso di avere il comportamento migliore è stata quella avente almeno una delle due pelli con direzione 0° rispetto alla direzione di sollecitazione.

Orientazione fibre del composito [gradi]	Spost. Totale [mm]	Deform. lungo l'asse x [mm]	Deform. lungo l'asse y [mm]	Deform. Lungo l'asse z [mm]	Modulo elastico Longitudinale [GPa]
0°/0°	1.51	0.326	0.401	1.507	170
0°/10°	1.70	0.344	0.340	1.801	160
0°/20°	1.9	0.365	0.326	2.012	151
0°/30°	2.45	0.382	0.303	2.418	144
0°/45°	2.74	0.402	0.290	2.723	137
0°/60°	2.76	0.407	0.282	2.763	136
0°/70°	2.80	0.411	0.239	2.780	134
0°/80°	2.80	0.413	0.238	2.781	133
0°/90°	2.81	0.420	0.237	2.788	132

Tabella 27: Soluzione italiana, deformazioni complessiva e lungo i tre assi (Primo tipo di disposizione delle fibre)

Orientazione fibre del composito [gradi]	Rotazione attorno asse x [rad]	Rotazione attorno asse y [rad]	Rotazione Attorno asse z [rad]
0°/0°	$5.815 \cdot 10^{-3}$	$3.432 \cdot 10^{-3}$	$7.900 \cdot 10^{-4}$
0°/10°	$5.481 \cdot 10^{-3}$	$4.134 \cdot 10^{-3}$	$9.932 \cdot 10^{-4}$
0°/20°	$5.197 \cdot 10^{-3}$	$4.512 \cdot 10^{-3}$	$1.020 \cdot 10^{-3}$
0°/30°	$4.967 \cdot 10^{-3}$	$5.123 \cdot 10^{-3}$	$1.240 \cdot 10^{-3}$
0°/45°	$4.747 \cdot 10^{-3}$	$5.901 \cdot 10^{-3}$	$1.306 \cdot 10^{-3}$
0°/60°	$4.248 \cdot 10^{-3}$	$6.010 \cdot 10^{-3}$	$1.251 \cdot 10^{-3}$
0°/70°	$3.978 \cdot 10^{-3}$	$5.990 \cdot 10^{-3}$	$1.199 \cdot 10^{-3}$
0°/80°	$3.605 \cdot 10^{-3}$	$5.898 \cdot 10^{-3}$	$1.178 \cdot 10^{-3}$
0°/90°	$3.266 \cdot 10^{-3}$	$5.888 \cdot 10^{-3}$	$1.172 \cdot 10^{-3}$

Tabella 28 Soluzione americana rotazioni lungo i tre assi (Primo tipo di disposizione delle fibre).

Orientazione fibre del composito [gradi]	Spost. Totale [mm]	Deform. lungo l'asse x [mm]	Deform. lungo l'asse y [mm]	Deform. Lungo l'asse z [mm]	Modulo elastico Longitudinale [GPa]
90°/0°	2.80	0.420	0.237	2.789	132
90°/10°	4.01	0.419	0.375	4.004	115
90°/20°	7.25	0.762	0.539	7.238	72.4
90°/30°	11.6	1.210	0.646	11.545	45.6
90°/45°	18.0	1.873	0.881	18.016	29.5
90°/60°	22.5	2.251	0.951	22.478	24.5
90°/70°	24.8	2.560	1.178	24.818	21.6
90°/80°	25.7	2.667	1.249	25.671	20.7
90°/90°	25.8	2.691	1.288	25.798	20.5

Tabella 29: Soluzione italiana, deformazioni complessiva e lungo i tre assi (Secondo tipo di disposizione delle fibre)

Orientazione fibre del composito [gradi]	Rotazione attorno asse x [rad]	Rotazione attorno asse y [rad]	Rotazione Attorno asse z [rad]
90°/0°	$3.266 \cdot 10^{-3}$	$5.888 \cdot 10^{-3}$	$1.172 \cdot 10^{-3}$
90°/10°	$6.091 \cdot 10^{-3}$	$8.355 \cdot 10^{-3}$	$1.756 \cdot 10^{-3}$
90°/20°	$8.966 \cdot 10^{-3}$	$1.455 \cdot 10^{-2}$	$3.586 \cdot 10^{-3}$
90°/30°	$1.073 \cdot 10^{-2}$	$2.2970 \cdot 10^{-2}$	$4.7655 \cdot 10^{-3}$
90°/45°	$1.108 \cdot 10^{-2}$	$3.657 \cdot 10^{-2}$	$7.179 \cdot 10^{-3}$
90°/60°	$1.108 \cdot 10^{-3}$	$4.502 \cdot 10^{-2}$	$7.310 \cdot 10^{-3}$
90°/70°	$1.125 \cdot 10^{-3}$	$4.8637 \cdot 10^{-2}$	$7.556 \cdot 10^{-3}$
90°/80°	$1.128 \cdot 10^{-3}$	$4.898 \cdot 10^{-2}$	$6.750 \cdot 10^{-3}$
90°/90°	$1.137 \cdot 10^{-3}$	$4.903 \cdot 10^{-3}$	$6.486 \cdot 10^{-3}$

Tabella30: Soluzione americana rotazioni lungo i tre assi (Secondo tipo di disposizione delle fibre).

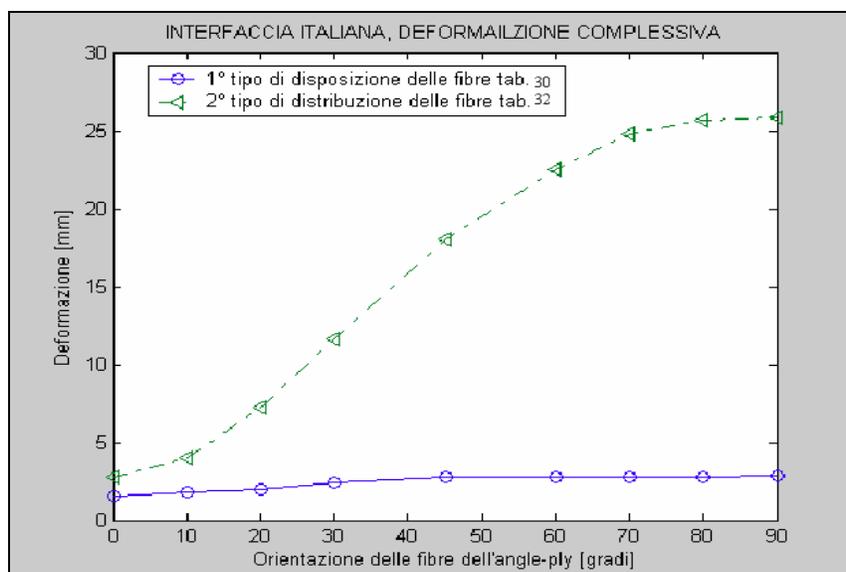


Figura 105: Soluzione italiana. Deformazioni totali in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

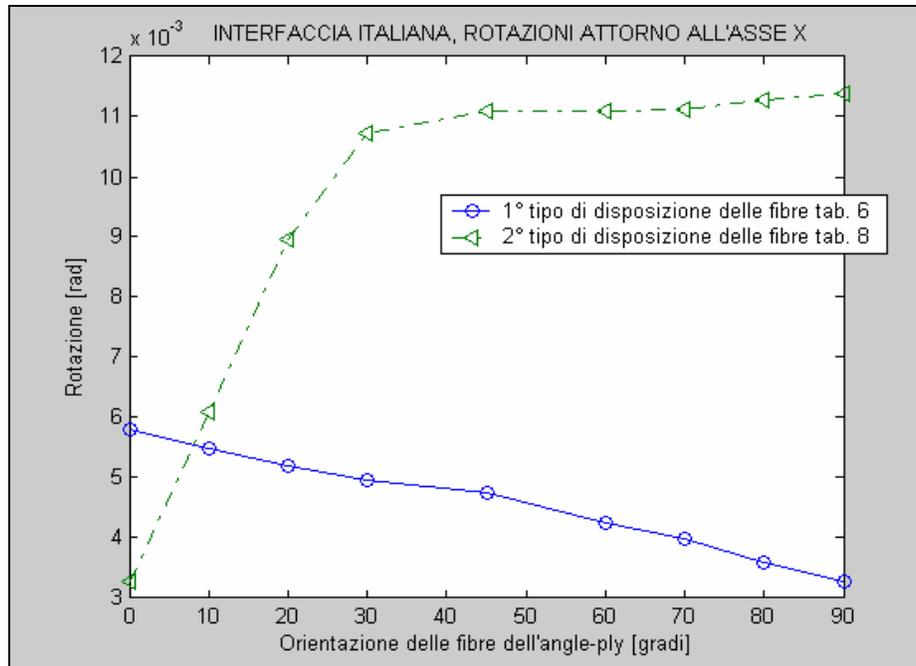


Figura 106: Soluzione italiana. Deformazioni lungo l'asse x in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

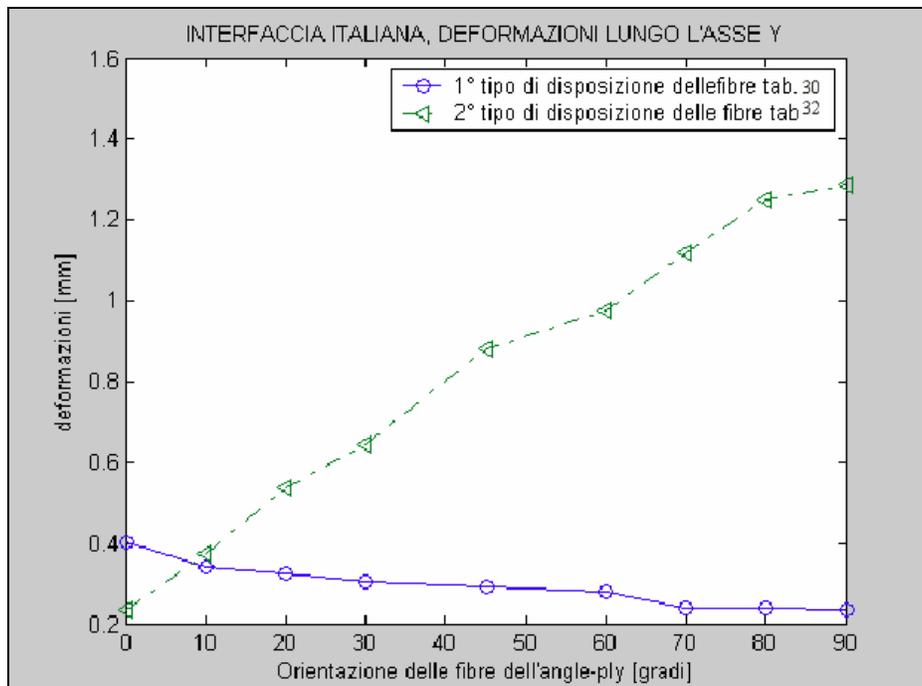


Figura 107: Soluzione italiana. Deformazioni lungo l'asse y in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

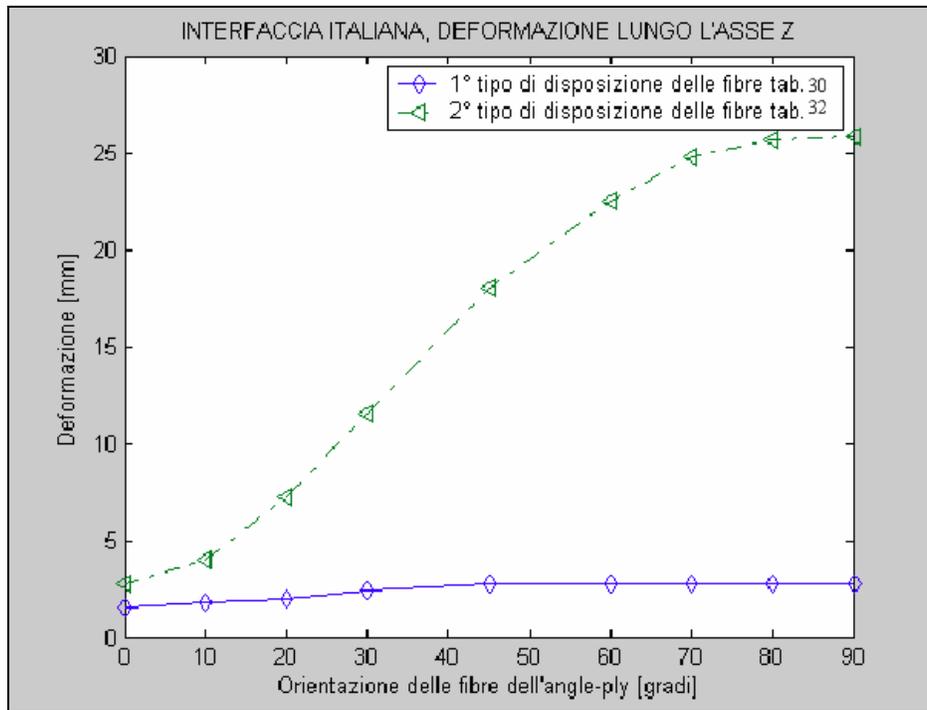


Figura 108: Soluzione italiana. Deformazioni lungo l'asse z in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

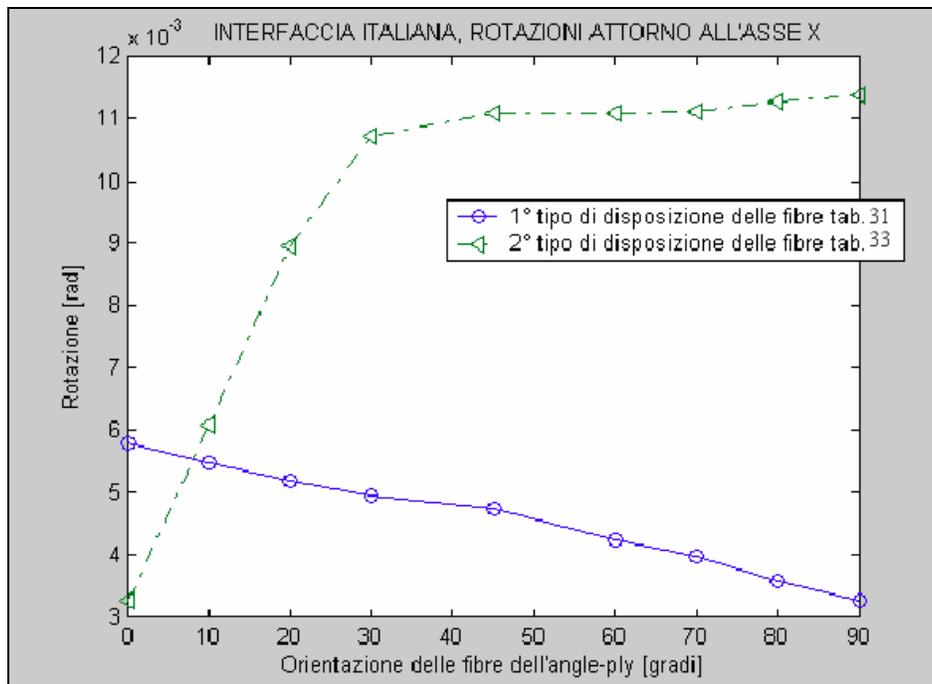


Figura 109: Interfaccia italiana. Confronto tra le rotazioni attorno all'asse x in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

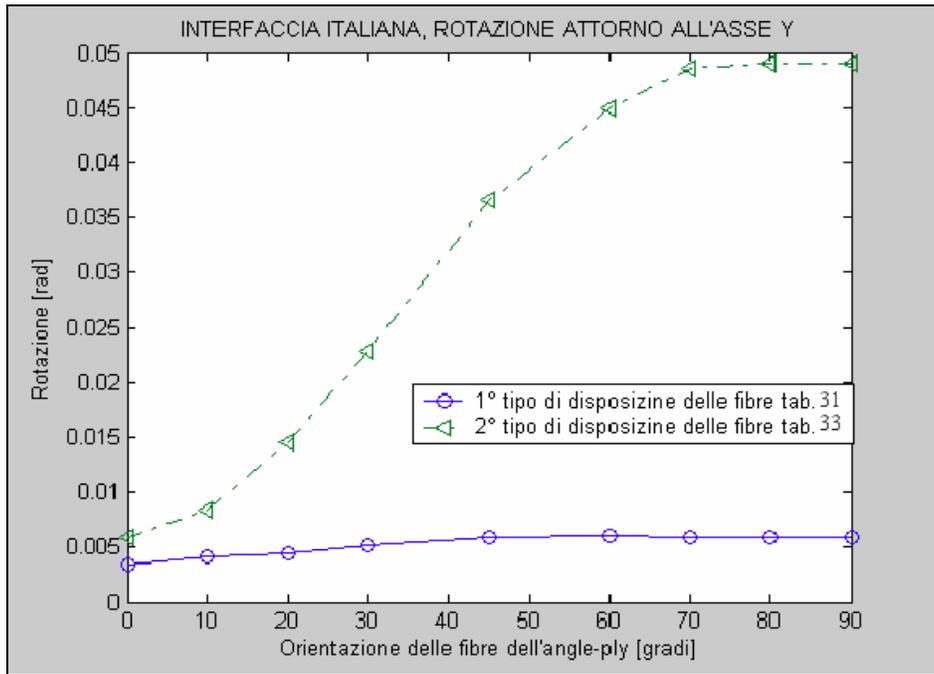


Figura 110: Interfaccia italiana. Confronto tra le rotazioni attorno all'asse y in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

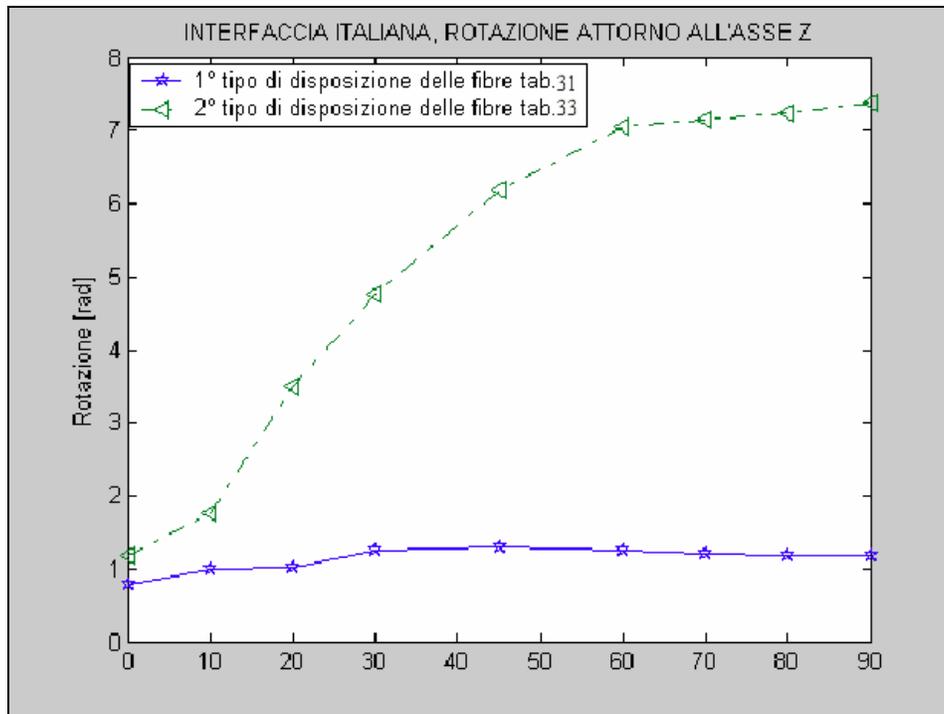


Figura 111: Interfaccia italiana. Rotazioni attorno all'asse z in funzione delle diverse orientazioni delle fibre dell'angle-ply.

6.7.3 Analisi comparata dei risultati ottenuti

Allo studio individuale delle due soluzioni è seguita un'analisi comparata tra le stesse, questo ha permesso di valutare quella che, a parità di carico è in grado di assicurare spostamenti di minor entità, le figure di riferimento in questo caso vanno dalla 113 alla 119.

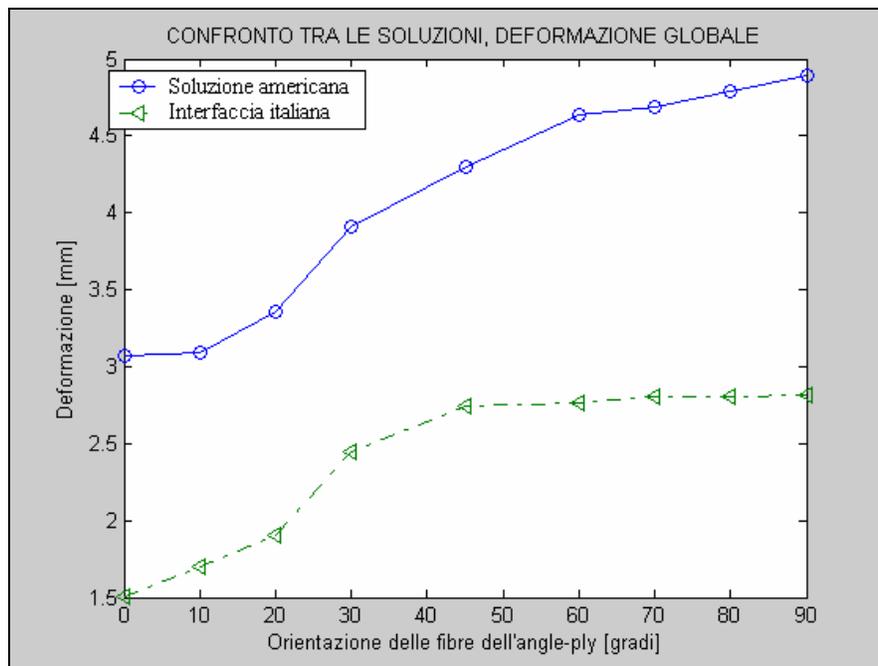


Figura 112: Analisi comparata tra le due soluzioni, si sono valutati le deformazioni compressive delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

Dall'analisi dei risultati e dallo studio comparato tra le due soluzioni si evince come l'interfaccia italiana risulti essere più rigida complessivamente della soluzione americana. Quest'ultima, tuttavia, subisce una deformazione lungo la sua direzione assiale di entità inferiore, questo comportamento è comprensibile perché c'è uno spessore doppio di composito rispetto alla soluzione italiana. Un riscontro ulteriore a questo risultato è dato dai tests, descritti in precedenza, in quella sede si è fatto notare come la rigidità assiale della struttura americana è risultata essere la maggiore tra le due.

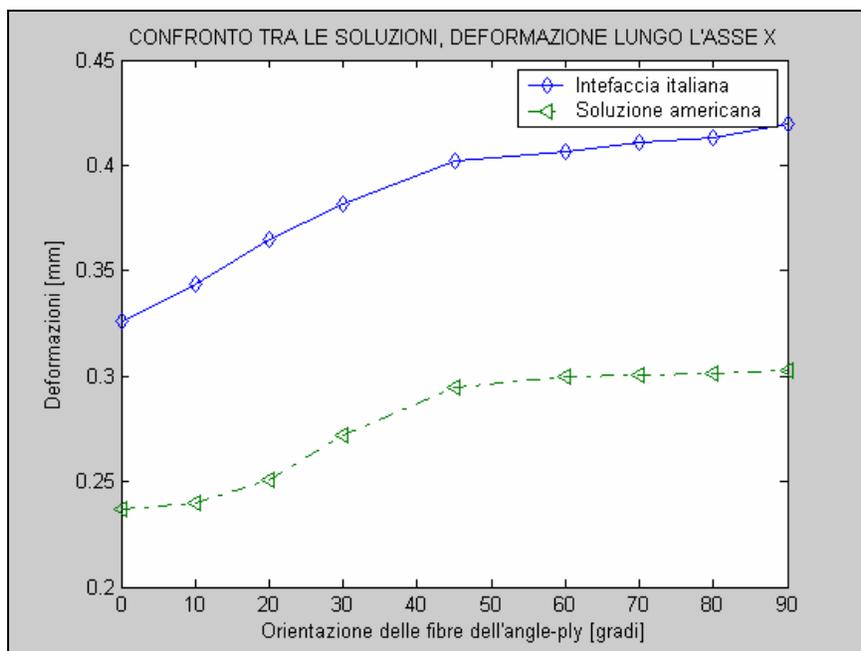


Figura 113: Analisi comparata tra le due soluzioni, si sono valutati le deformazioni lungo l'asse x delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

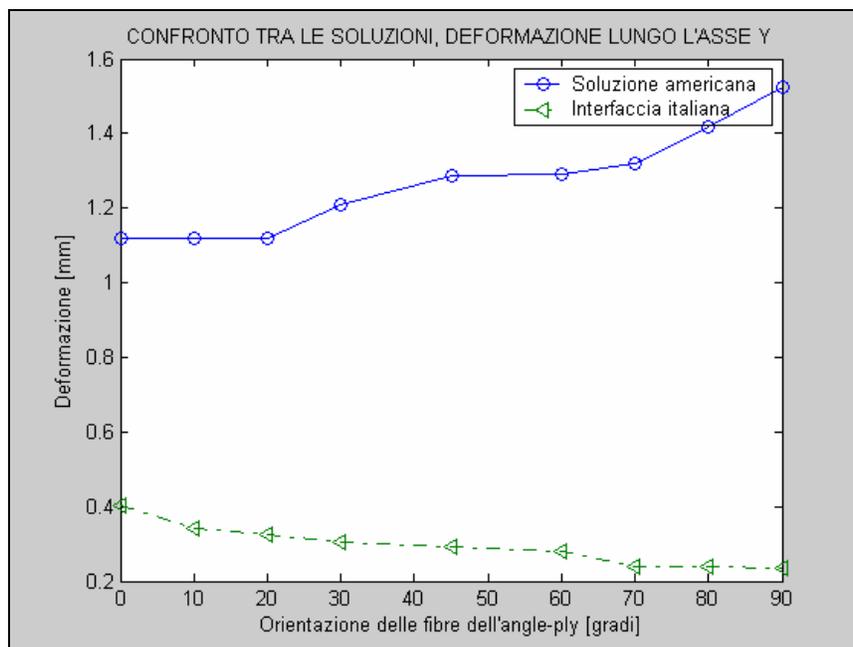


Figura 114: Analisi comparata tra le due soluzioni, si sono valutati le deformazioni lungo l'asse y delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

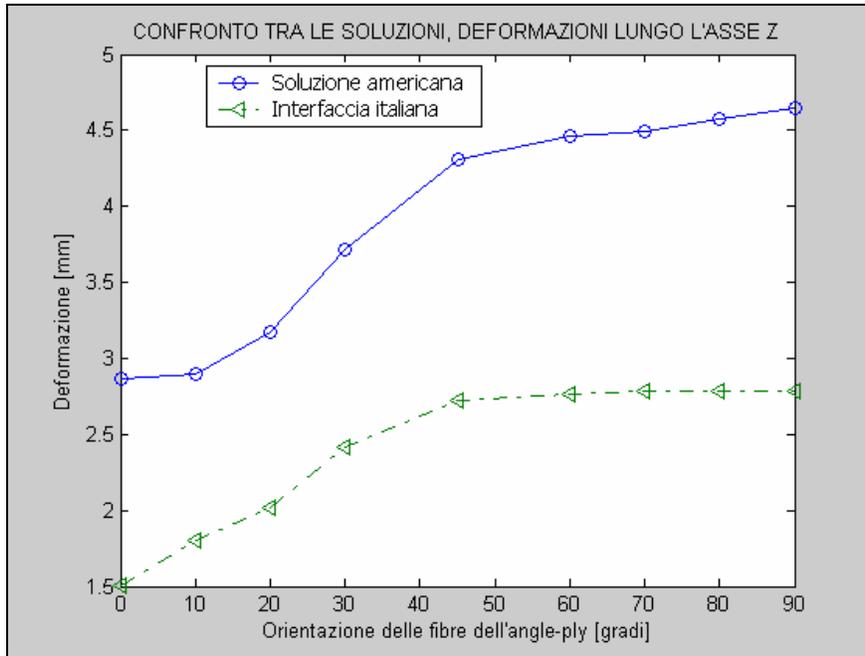


Figura 115: Analisi comparata tra le due soluzioni, si sono valutati le deformazioni lungo l'asse z delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in azzurro si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

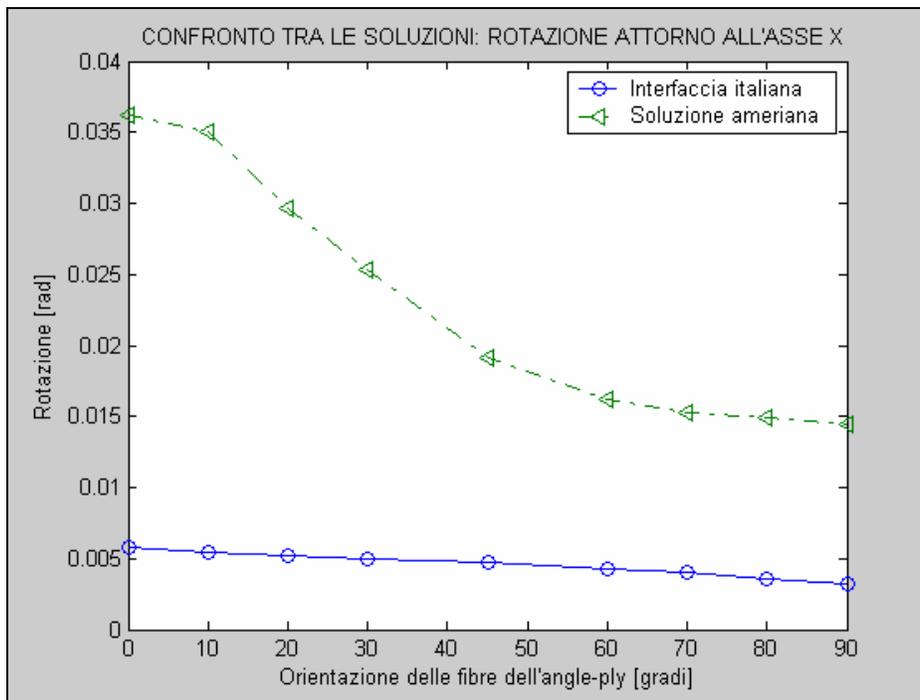


Figura 116: Confronto tra le due soluzioni, si sono valutati le rotazioni attorno all'asse x delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

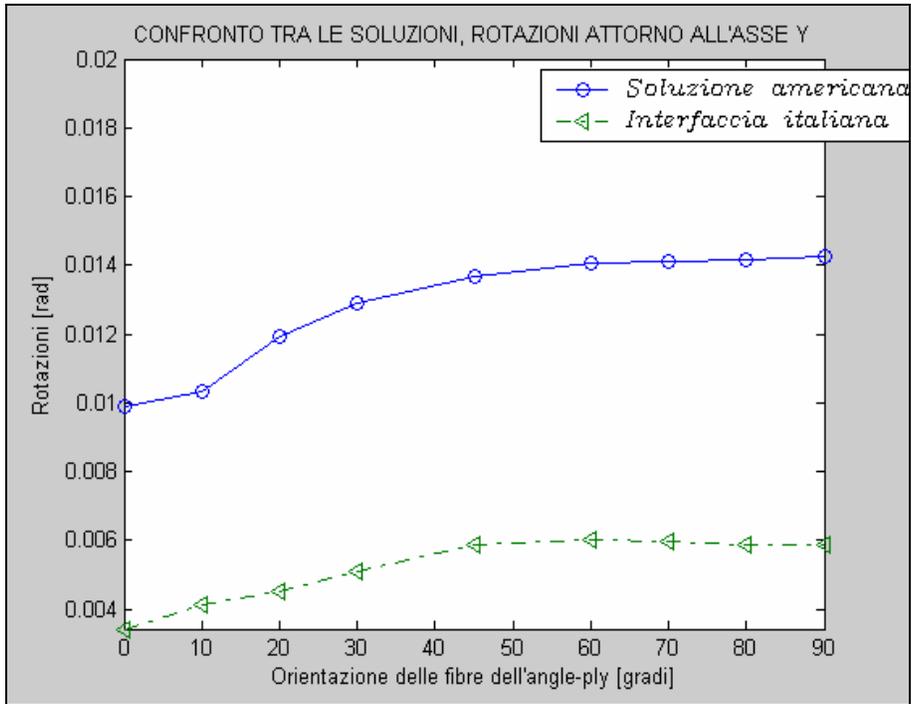


Figura 117: Confronto tra le due soluzioni, si sono valutati le rotazioni attorno all'asse y delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

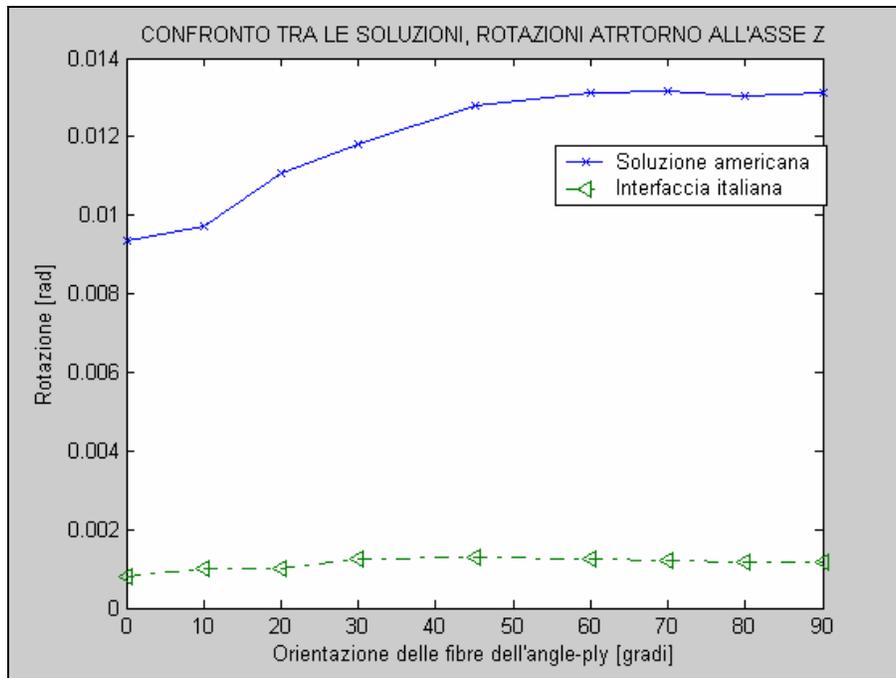


Figura 118: Confronto tra le due soluzioni, si sono valutati le rotazioni attorno all'asse z delle due strutture meccaniche in funzione della diversa orientazione delle fibre, in verde si è realizzata la caratteristica dell'interfaccia italiana.

	Soluzione americana		Interfaccia italiana	
	Materiale isotropo	Composito angle-ply	Materiale isotropo	Composito angle-ply
Modulo Elastico [GPa]	200	232	200	170
Deformazione complessiva [mm]	2.11	3.07	1.28	1.51
Deformazione Lungo l'asse x [mm]	0.201	0.236	0.305	0.326
Deformazione Lungo l'asse y [mm]	1.011	1.1178	0.121	0.401
Deformazione Lungo l'asse z [mm]	2.026	2.869	1.278	1.507
Rotazione attorno all'asse x [rad]	$5.771 \cdot 10^{-3}$	$3.615 \cdot 10^{-2}$	$1.60 \cdot 10^{-3}$	$5.815 \cdot 10^{-3}$
Rotazione attorno all'asse y [rad]	$6.450 \cdot 10^{-3}$	$9.921 \cdot 10^{-3}$	$2.919 \cdot 10^{-3}$	$3.432 \cdot 10^{-3}$
Rotazione attorno all'asse z [rad]	$5.901 \cdot 10^{-3}$	$2.869 \cdot 10^{-2}$	$5.945 \cdot 10^{-4}$	$7.900 \cdot 10^{-4}$

Tabella riassuntiva: Tabella riportante i risultati relativi al materiale isotropo ed al composito che meglio si comporta con i valori numerici relativi alle due soluzioni presentate.

Esito diverso hanno dato i confronti tra gli altri spostamenti delle due soluzioni, in questi altri casi è l'interfaccia italiana ad avere le minori deformazioni, anche queste analisi sono confermabili confrontando i risultati con quelli delle sollecitazioni elementari presi in considerazione in precedenza.

Un miglior comportamento complessivo della seconda soluzione presentata è da attribuirsi alla maggior rigidità conferita alla stessa della presenza di un espanso in quantitativo maggiore. Lo spessore dimezzato delle pelli sembra infatti essere più che compensato dalla presenza del foam distribuito uniformemente all'interno di tutta la sezione e non posto solo in alcuni punti come fatto nella prima soluzione.

Altro aspetto importante da sottolineare è la minor entità della deformazione torsionale dell'interfaccia rispetto alla soluzione americana, è stato infatti notato come il complessivo carico

degli straws applicato al supporto genera una torsione dello stesso attorno al proprio asse. Questo effetto, generato dalla non coincidenza tra centro di massa e centro elastico del frame, è stato presentato essere uno degli aspetti critici della struttura ai fini di un corretto posizionamento della sensoristica montata sul supporto, una sua riduzione permette una maggior precisione nelle misure da effettuare⁴¹.

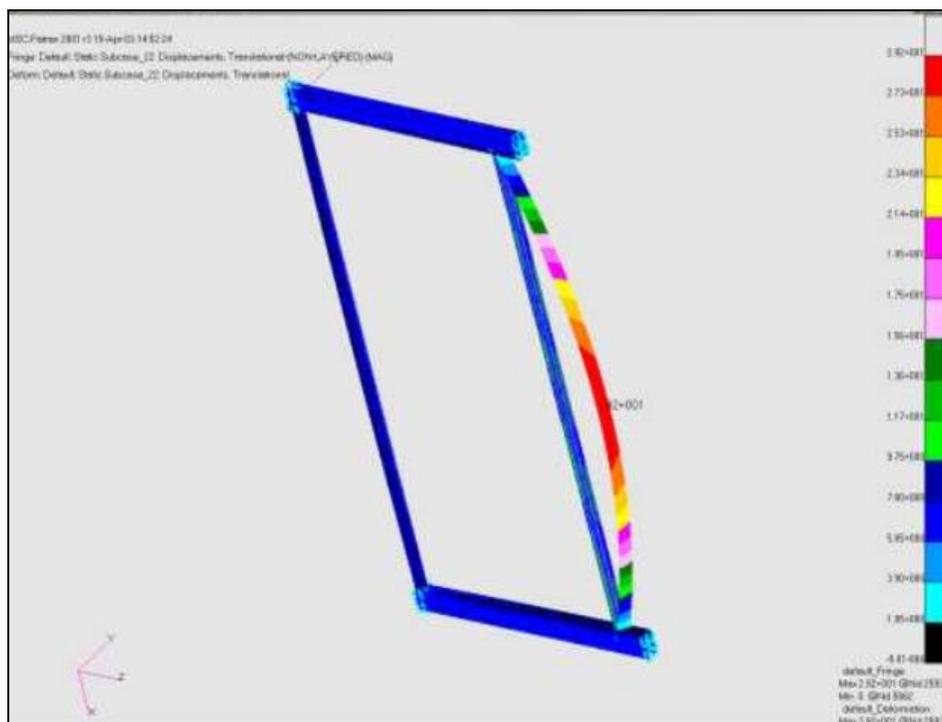


Figura 119: Soluzione americana, deformata del supporto con il supporto per straws, si noti come la deformazione di questa struttura non è solamente assiale ma ha anche componenti trasversali alla sezione, questo è dovuto al fatto che il centro elastico non coincide con il baricentro.

Le strutture risultano essere entrambe compresse in direzione assiale, c'è da sottolineare come esse subiscano anche delle deformazioni nel piano trasversale nonostante la sollecitazione

⁴¹ L'aver una rotazione attorno all'asse vuol dire introdurre una torsione della struttura secondo una direzione perpendicolare alla beam-pipe, nell'eventualità che si dovessero montare sul supporto per straws anche le microstrips sarebbe fondamentale evitare torsioni in questa direzione di questi altri sensori, dovendo questi ultimi rimanere perfettamente trasversali alla direzione del moto delle particelle.

applicata abbia solo una componente perpendicolare alla sezione. Questo comportamento è spiegabile dal momento che il centro elastico del supporto per straws non va a coincidere con il baricentro in entrambe le soluzioni, si genera nel complesso una freccia non nulla anche nel piano trasversale all'asse, si vedano figure 120 e 121. I motivi mancata coincidenza tra il centro di massa e quello elastico sono da ricercarsi nella complessità di forma delle due soluzioni e nell'impiego di materiali aventi moduli elastici differenti tra di loro, non bisogna inoltre dimenticare l'anisotropia intrinseca del composito impiegato, specie nell'interfaccia italiana non essendo possibile in questo caso, avendo a disposizione solo due pelli di pre-preg, realizzare un quasi isotropo.

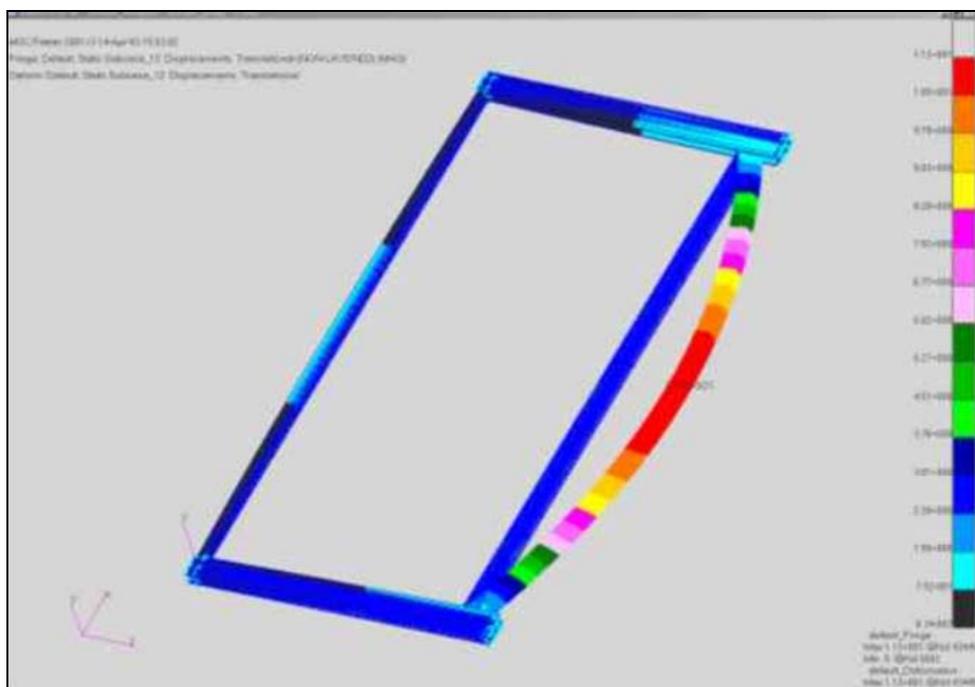


Figura 120: Soluzione italiana, deformata del supporto con l'interfaccia per straws la deformazione, anche in questo caso, non è solamente assiale ma ha componenti trasversali alla sezione, il centro elastico non coincide con il baricentro nemmeno in questo caso.

Lo studio condotto, non solo ha permesso di individuare quale tra le due soluzioni meglio risulta comportarsi in condizioni di servizio, ha anche individuato la disposizione dell'angle-ply che

riduce ulteriormente le deformazioni. Dallo studio condotto al FEM e dalla successiva analisi dei risultati si è stabilito che la disposizione delle fibre del pre-preg ottimale è quella che prevede i fogli di composito unidirezionale orientati tutti nella stessa direzione, disposti parallelamente al vettore dello sforzo.

Capitolo 7

TARATURA DEL PROTOTIPO DEL SUPPORTO

ESTERNO

A fianco all'analisi delle soluzioni per la realizzazione del supporto per straws si è eseguita anche una taratura del supporto esterno. L'aver un confronto tra modello virtuale, realizzato al FEM e prototipo reale, montato in laboratorio ha permesso di comprendere meglio la meccanica del sistema in esame. Lo studio eseguito sull'intero supporto è stato condotto per avere l'idea di quelle che sono le sollecitazioni del supporto inserito nella struttura in cui è montato. L'analisi si è sviluppata in steps successivi passando da un modello unidimensionale preliminare ad uno tridimensionale più dettagliato, questo ha permesso di avere un primo banco di prova virtuale in grado di fornire dati in enormi quantitativi per la successiva e più lunga taratura del modello 3-D. La necessità di avere necessariamente un modello solido al FEM deriva dall'esigenza di applicare carichi anche fuori dall'asse del supporto, in questo modo si possono andare ad applicare le forze dovute agli straws ed all'altra sensoristica in modo più rapido, senza dover eseguire calcoli per la determinazione di sollecitazioni meccaniche equivalenti da applicare al caso unidimensionale.

La taratura eseguita si è basata su sole sollecitazioni di tipo meccanico, essendo il prototipo posto in laboratorio in condizioni termiche stabili, non si ha idea di quello che potrebbe essere l'eventuale comportamento di questa struttura in seguito all'applicazione di gradienti di temperatura. L'esecuzione di un'analisi termica non è tuttavia necessaria, in condizioni di servizio, dovendo il sistema lavorare in condizioni di irraggiamento stabile per la presenza di particelle, non si generano surriscaldamenti con conseguente generazione di stress da temperatura se non in fase di fermo macchina e successivo riavvio dell'esperimento.

7.1 Descrizione del modello

Il prototipo del telaio ha le seguenti dimensioni:

- Altezza dal banco di taratura 67 cm;
- Lunghezza transetto 87 cm;



Figura 121: Foto del prototipo reale realizzato presso i laboratori dello stabilimento ENEA di Frascati (RM).

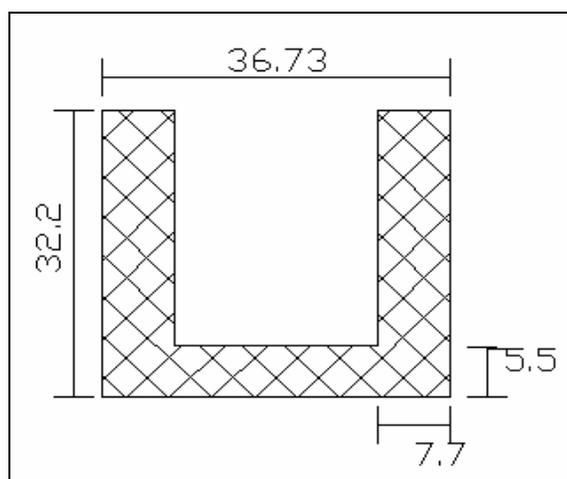


Figura 122: Rappresentazione su AutoCad della sezione trasversale del transetto con le relative quote, i valori riportati sono in mm.

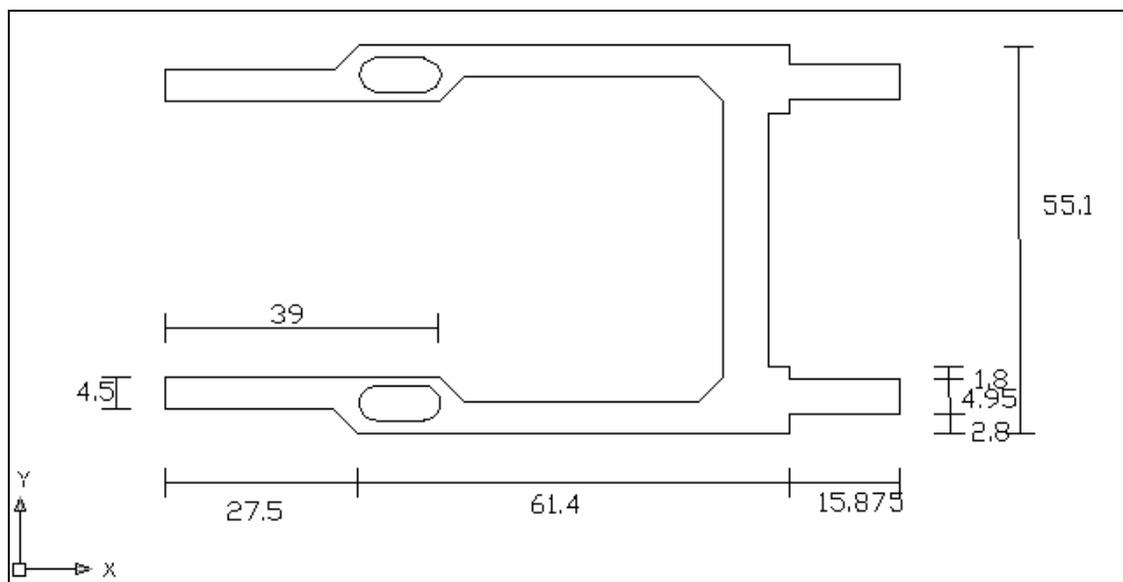


Figura 123: Rappresentazione su AutoCad della sezione del supporto a contatto con l'interfaccia.

Per quanto riguarda la descrizione delle sezioni sia del transetto che delle due sezioni trasversali vale quanto detto nella descrizione del supporto per l'esecuzione dell'analisi comparata tra le soluzioni americana ed italiana descritte in precedenza, si riportano comunque, per completezza, due immagini relative alle due sezioni sopra menzionate con le corrispondenti quote principali, figure 123 e 124. Il materiale della struttura è come detto anticorodal.

7.2 Vincoli e carichi

Oltre ai vincoli interni già descritti nella sopra nominata sezione si sono introdotti dei vincoli anche sul banco di taratura per fissare il frame, si riporta in figura 125 un disegno con la corretta forma e corrispondenti quote della staffa usata, di seguito anche una foto, figura 126 del particolare del prototipo descritto.

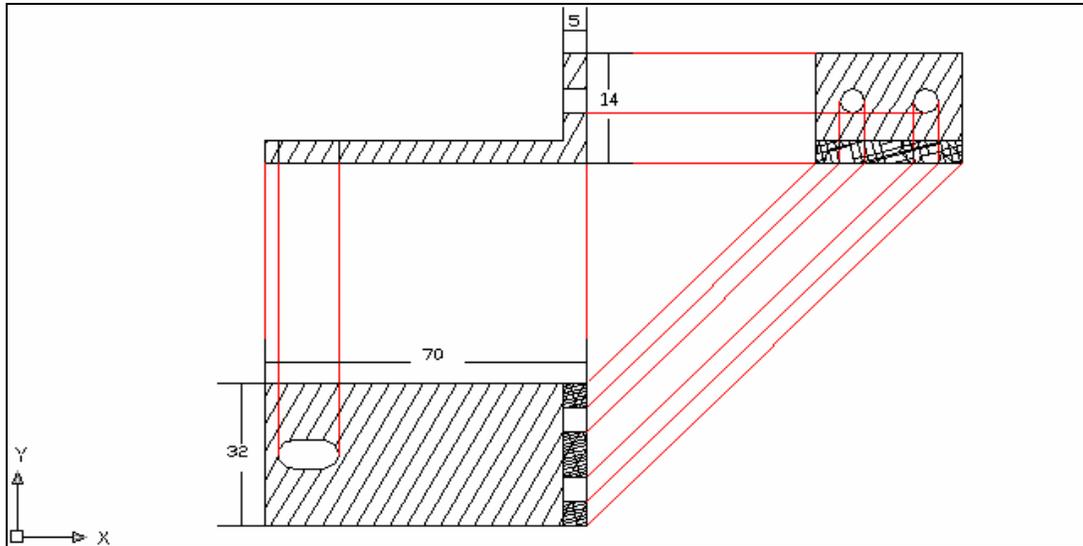


Figura 124: Rappresentazione AutoCad del vincolo impiegato per fissare sul banco di lavoro il supporto montato nei laboratori dell'ENEA.



Figura 125: Foto della staffa che fissa al banco di taratura il prototipo del frame.

I carichi utilizzati per eseguire la taratura sono stati di due tipi:

- Gravi;
- Molle di trazione.

L'impiego di due diverse tipologie di forze di prova ha permesso di avere altrettanti tipi di deformazioni della struttura tra loro indipendenti, in questo modo, eseguita la taratura con i pesi applicati si è potuto verificare l'esattezza del prototipo virtuale con le molle.



Figura 126: In alto a destra del particolare del supporto si noti il vincolo interno al prototipo, si noti anche la fibra ottica applicata in quella zona.

7.2.1 Gravi

La prima tipologia di carichi utilizzati è costituita, come detto, da dei gravi applicati in una posizione nota del transetto, per effetto del peso, tali corpi hanno generato una forza di intensità nota, data dal prodotto della loro massa per l'accelerazione di gravità. Per avere un preciso punto di applicazione dei carichi si è diviso il transetto in sei parti uguali tra loro e si sono contrassegnati gli estremi con delle marche. Il punto preciso in cui si sono applicati i gravi è posto alla distanza di 14.5 cm dal bordo del transetto; non si è potuto applicare il peso in corrispondenza della mezzeria, come sarebbe stato più logico fare, per la presenza di un comparatore ottico laser, di cui si farà cenno in seguito, posto proprio in quel punto.

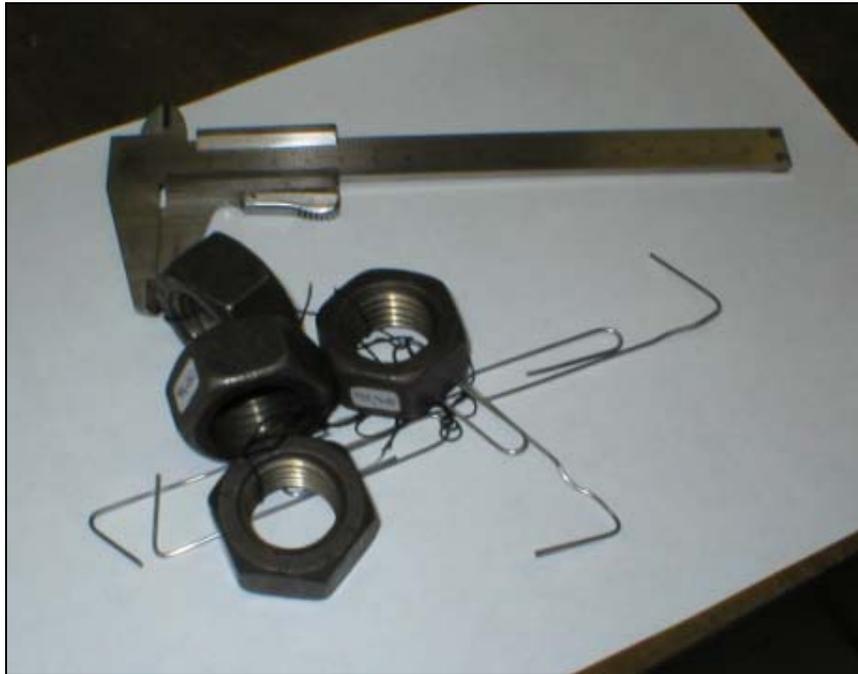


Figura 127: Dadi utilizzati come gravi per la taratura del frame.

Come gravi utilizzati si sono utilizzati dei dadi, si guardi figura 128, preventivamente pesati. Si sono applicati al supporto agganciandoli con delle graffe, anch'esse di massa nota, in modo da avere un carico crescente, si sono misurate quindi le deformazioni della struttura da essi generata⁴². La sequenza di carichi applicata ha previsto l'applicazione in successione rispettivamente di 1, 3 e 10 gravi. La corrispondente successione di carichi con le forze generate è stata riportata in tabella 30, la sequenza di applicazione, ripetuta per due volte onde evitare errori di misura, ha previsto una prima fase di applicazione delle varie masse seguita dalla fase di scarico. Tra una perturbazione e l'altra del sistema, provocata dall'applicazione dei dadi, si è fatto trascorrere un tempo di un minuto nella prima serie di applicazione dei carichi e due per la seconda, in questo modo si è permesso al sistema di tornare ogni volta in equilibrio.

	Numero di carichi (peso dei singoli costituenti in grammi)	Peso tot. [g]	Forza [N]
1° carico	1 dado (93.84) 1 graffa (1.6)	95.44	0.9353
2° carico	4 dadi (93.84; 95.038; 93.918; 95.295) 4 graffe (1.6x4)	384.491	3.772
3° carico	10 dadi (93.84; 95.038; 93.918; 95.295; 94.680; 95.446; 93.666; 95.023; 94.381; 93.330) 10 graffe (1.6x10)	960.617	9.424

Tabella 30: Sequenza di carichi applicata per la prima fase di taratura. La successione ha previsto due fasi successive di carico e scarico della struttura.

Essendo carichi soggetti all'accelerazione di gravità il vettore forza generato ha una direzione verticale con verso diretto in basso. Si è ritenuto, essendo la sollecitazione trasversale applicata al transetto più gravosa di quella generata sulle sezioni laterali dalle molle appresso descritte, di introdurre dei pesi ridotti.

⁴² Per una breve descrizione degli strumenti di misura impiegati si guardi il seguito di questa sezione.

7.2.2 Molle di trazione

Le molle di trazione utilizzate sono quelle la cui denominazione standard è TRZ 078.

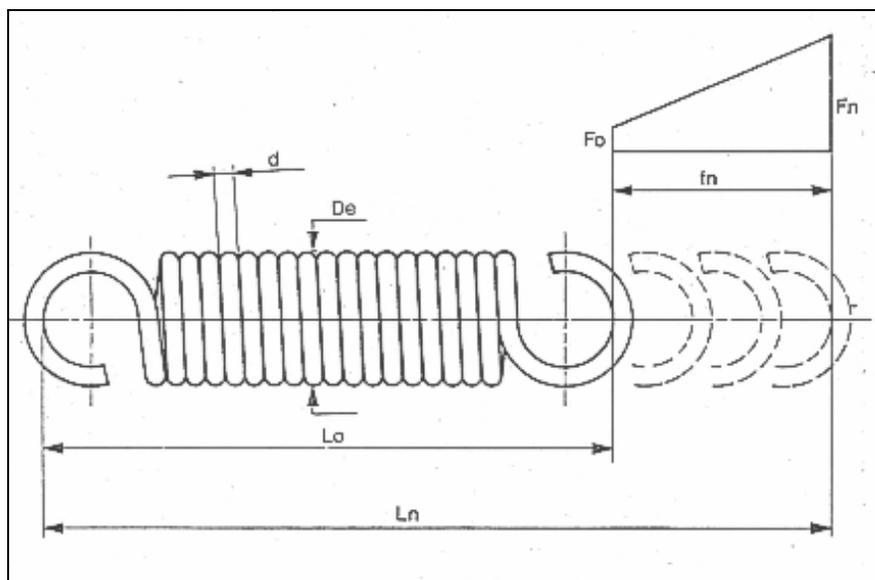


Tabella 31: Molla di trazione TRZ 078, impiegata per effettuare la taratura del frame.

Alla simbologia in foto si attribuiscono i seguenti valori:

d = Diametro del filo in mm.

D_e = Diametro esterno della molla, in mm.

L_o = Lunghezza libera, quella della molla non sottoposta a carico, misurata dall'interno degli occhielli, in mm.

F_o = Precarica della molla, in kgf (kilogrammo forza).

F_n = Carico massimo al quale può essere sottoposta la molla, in kgf.

L_n = lunghezza della molla quando è sottoposta al carico F_n , in mm.

f_n = Freccia (allungamento) della molla quando è sottoposta al carico F_n , in mm.

Rg = Rigidità della molla (rapporto tra l'aumento del carico e l'allungamento corrispondente della molla),
in kgf/mm.

I = Spire utili.

Per la determinazione della lunghezza interna degli occhielli la formula è:

$$L_g = \frac{L_o - d * (i + 1)}{2} \quad (6)$$



Figura 128: Prototipo del supporto con carico di trazione generato da 9 catene tensionate da altrettante molle di trazione, il dispositivo che si vede in figura è un comparatore laser in grado di valutare lo spostamento verticale del transetto.

Nel caso preso in esame i corrispondenti valori sono riportati in tabella 32.

Denominazione: TRZ 078	D	De	Fo	Fn	
	1.50	10.00	0.89	11.14	
	Lo	Ln	fn	Rg	i
	46.5	63.30	16.80	0.61	13.5

Tabella 32: Descrizione delle caratteristiche e specifiche della molla utilizzata per la taratura.

Queste molle sono state impiegate per applicare dei carichi di trazione sulle due sezioni verticali del prototipo su banco. Si sono infatti collegate nella parte centrale di 9 catene, supposte di massa trascurabile, tenute ancorate al supporto mediante dei ganci, si veda la figura 129 per il posizionamento delle catene all'interno del frame. In figura 130 invece si è fotografato il prototipo nella parte in cui sono calettati i ganci per applicare le catene.

Numero indicativo delle molle	Distanza dal banco di taratura [cm]	Interdistanza tra i ganci [cm]
1	3.5	-
2	10.5	7
3	18	7.5
4	24.5	6.5
5	31.5	7
6	38.5	7
7	46	7.5
8	53	7
9	60	7

Tabella 33: Numero di identificazione delle molle con le distanze dal banco di taratura e dalla molla immediatamente sottostante.

Come detto si sono applicate in tutto 9 molle, ognuna è stata tensionata fino a raggiungere un allungamento corrispondente a 10 kg di peso con direzione orizzontale, trasversalmente alle due sezioni laterali del frame, con verso diretto verso la parte interna della struttura. La posizione dei

ganci è in corrispondenza della mezzeria della sezione, come si può vedere in figura 130, si sono praticati dei fori per alloggiare le viti, in tabella 33 si sono riportate le posizioni delle catene con le corrispondenti distanze.



Figura 129: Supporto ENEA nella sezione in cui si sono avvitati i ganci per il tensionamento delle catene con collegate le molle di trazione.

Prima dell'inizio della prova su banco vera e propria è stato necessario verificare la corretta rigidità delle molle mediante l'applicazione di masse note e contemporanea misurazione dell'allungamento subito dalle stesse in fase di carico. Nota la deformazione prodotta dall'applicazione di gravi di massa nota è stato possibile correlare tale allungamento con la forza che lo ha generato. Solo dopo aver realizzato delle caratteristiche che correlano la rigidità al peso applicato

è stato possibile iniziare la prova di banco vera e propria, in questa sede si è verificato come per avere un carico di 10 kg è stato necessario arrivare ad una deformazione⁴³ della molla di 2 cm.

La fase di testing per la realizzazione di una serie di risultati accettabili è stata abbastanza complicata, si sono eseguiti più di 10 fasi di carico e scarico della struttura per essere sicuri di avere dei dati accettabili. Molto cura è stata dedicata nel caricare e scaricare la struttura, non solo è necessario avere dei lunghi tempi morti tra il tensionamento di una molla e quello della successiva per permettere alla catena appena tensionata di stabilizzarsi ed essere in condizione di trasmettere un carico statico al frame, è anche importante porre molta cura in fase di carico onde evitare eccessive perturbazioni alle parti già tensionate. Durante le successive sequenze di carico del sistema si sono applicati degli intervalli tra l'applicazione di un carico e quella del successivo variabili da mezzo minuto a 2 minuti. Specie per il segnale proveniente dalle fibre ottiche, si è notata una buona nitidezza e stabilità quando si sono effettuati intervalli di recupero maggiori, di contro, per transienti brevi, si sono avute distorsioni di ampiezza confrontabile con quella del segnale, rendendo di fatto poco possibile l'interpretazione dei risultati. La fase di carico e scarico della struttura ha richiesto anche molta cura nell'esecuzione riguardo alla sequenza corretta di applicazione e rilascio delle tensioni delle catene. E' stato rispettato molto rigorosamente l'ordine dato dalla numerazione dei ganci di tabella 31, in questo modo è stato possibile, dopo alcuni tentativi fallimentari, ottenere alcune misure nitide importanti per le analisi seguenti.

7.3 Dispositivi di misura impiegati

Durante le fasi di applicazione e rimozione dei carichi descritti in precedenza è stato

⁴³ Secondo la simbologia introdotta nelle pagine precedenti la deformazione corrisponde al valore di f_n .

necessario monitorare il comportamento della struttura e rilevare le deformazioni subite dalla stessa in seguito all'applicazione delle sollecitazioni. In questo caso si è cercato di avere delle misure che risultassero indipendenti tra loro onde evitare sgradevoli interazioni tra le stesse, per realizzare quanto detto si sono impiegati due diversi tipi di sensori:

- Fibre ottiche;
- Comparatore laser.

7.3.1 Fibre ottiche

Le fibre ottiche, attualmente molto diffuse nel campo delle telecomunicazioni e dell'informatica, sono in grado di trasportare un fascio di luce da un dispositivo sorgente, generalmente costituito da un diodo laser, ad un fotodiodo posto a valle del sensore per la rilevazione. Esse sono in grado di guidare un fascio di luce attraverso un sottile cilindro di vetro, denominato fibra, in questo modo si possono trasferire informazioni di diversa natura da un capo all'altro di tali dispositivi. I vantaggi rispetto ad altri sensori sono principalmente questi: ridotto ingombro del sensore, alta velocità di risposta maggiore rispetto ad altri dispositivi analoghi (1000 volte più veloci di un comune stringage) ed una elevata stabilità del segnale (il segnale trasferito, in quanto ottico, non risente della presenza di campi magnetici).

Queste fibre sono realizzate generalmente per trafilatura e successivo rivestimento di un materiale ad alto indice di rifrazione, generalmente vetro a base di SiO_2 , con un altro avente un indice piuttosto basso, comunemente si usano dei polimeri. In una struttura di questo tipo, il fascio luminoso viene deviato ed incanalato all'interno di questo tubo e può essere trasportato da un capo all'altro dello stesso. Se utilizzate come sensori sono in grado di associare uno spostamento nella

direzione parallela all'asse della fibra ad una variazione della lunghezza d'onda del fascio di luce in ingresso secondo la relazione⁴⁴:

$$\Delta\lambda=0,78\lambda\varepsilon \quad (7)$$

Questi sensori sono stati posti in due punti della struttura:

- Nella parte del transetto in corrispondenza del punto relativo al limite del primo sesto⁴⁵, posto a distanza di 14.5 cm dal bordo interno del prototipo nel punto di collegamento con le sezioni verticali;
- In corrispondenza della mezzeria della sezione verticale in corrispondenza della semilunghezza complessiva, a 33.5 cm dal banco di taratura.

Numero identificativo della molla	$\lambda_{iniziale}$ [nm]	λ_{finale} [nm]	T _{frame} [°C]	T _{lab} [°C]	Umidità %
9	1534.1139	1534.114000	15.9	20.4	31
8	1534.1142	1534.114320	20.0	20.4	31
7	1534.1145	1534.114558	20.0	20.4	31
6	1534.1148	1534.114851	19.9	20.4	31
5	1534.1151	1534.115151	19.9	20.4	31
4	1534.1154	1534.115449	19.9	20.4	31
3	1534.1157	1534.115757	19.9	20.4	31
2	1534.1200	1534.120109	19.9	20.4	31
1	1534.1203	1534.120358	19.9	20.4	31

Tabella 34: Dati relativi all'acquisizione durante una fase di scarico del frame, la fibra ottica di riferimento in questo caso è quella posta a 14.5 cm dal bordo del transetto.

In questo modo si sono valutati le deformazioni longitudinali provocate dall'applicazione del carico di tutti e due i componenti la struttura meccanica. Il vantaggio di usare questo tipo di sensori nel caso in esame è stato quello di poter avere la deformazione puntuale del pezzo, facendo

⁴⁴ Ricavata da precedenti lavori di tesi.

⁴⁵ Si ricordi che per avere il corretto posizionamento dei carichi e dei rivelatori si è diviso il transetto in parti uguali ognuna di lunghezza pari ad 1/6 di quella totale.

coincidere la zona di applicazione della fibra con un nodo, è stato possibile valutare il suo spostamento e confrontarlo con quello realmente misurato.

Numero identificativo della molla	Carico Applicato [kg] ([N])	$\Delta\lambda$	ε [$\cdot 10^{-7}$]
9	90 (882.9)	$3 \cdot 10^{-4}$	84
8	80 (784.8)	$3 \cdot 10^{-4}$	351
7	70 (686.7)	$3 \cdot 10^{-4}$	550
6	60 (588.6)	$3 \cdot 10^{-4}$	795
5	50 (490.5)	$6 \cdot 10^{-4}$	1045
4	40 (392.4)	$3 \cdot 10^{-4}$	1294
3	30 (294.3)	$3 \cdot 10^{-4}$	1552
2	20 (196.2)	$3 \cdot 10^{-4}$	2189
1	10 (98.1)	$2 \cdot 10^{-4}$	2397

Tabella 35: Elaborazione dei risultati di tabella 34 mediante l'equazione 7, i dati si riferiscono alla fibra ottica posta sul transetto.

In tabella 34 sono riportati alcuni valori misurati dalle fibre di una delle fasi di scarico della struttura con i relativi carichi applicati e le corrispondenti umidità e temperature della struttura e dell'ambiente di lavoro entrambe in grado di influenzare la misura. I dati di questa serie sono stati utilizzati per la taratura in quanto risultano essere poco affetti da perturbazione e quindi di maggior facilità di interpretazione.

7.3.2 Comparatore laser

Tale dispositivo ha il funzionamento simile a quello di un comune interferometro, si basa sull'interferenza luminosa e, in questo modo, si può valutare la differenza di quota di un provino rispetto a quella di un blocco campione di dimensione nota. Molto elevata è la precisione di questo strumento, si ha una sensibilità del decimo di micron, aspetto questo di notevole importanza ai fini

del test effettuato data la grande rigidità della struttura meccanica presa in esame. Un fascio laser, posizionato in corrispondenza della parte mediana del transetto, permette di valutare la deformazione trasversale all'asse del componente, il valore fornisce pertanto la freccia massima in corrispondenza dell'applicazione dei carichi descritti. Una preliminare taratura ha permesso di considerare come posizione zero il transetto in condizione di supporto scarico.



Figura 130: Immagine del comparatore laser impiegato per la misura della freccia del transetto durante la fase di testing del supporto realizzato in collaborazione con il centro ENEA di Frascati.

Si riportano i valori delle frecce misurate con il suddetto comparatore in seguito all'applicazione dei carichi prodotti dalla trazione delle molle, tabella 34, e dai gravi, tabella 36. Le misure della prima tabella sono state prese contemporaneamente a quelle con le fibre ottiche su questa analisi si è potuto verificare la bontà della taratura fatta.

Numero identificativo della molla	Carico Applicato [kg] ([N])	Spostamento [μm]
9	90 (882.9)	91
8	80 (784.8)	76
7	70 (686.7)	69
6	60 (588.6)	60
5	50 (490.5)	53
4	40 (392.4)	42
3	30 (294.3)	27
2	20 (196.2)	12
1	10 (98.1)	5

Tabella 36: Deformazione del transetto misurate con il comparatore laser in seguito all'applicazione dei carichi di trazione sulle parti verticali.

	Peso tot. [g]	Forza [N]	Spostamento misurato [μm]
1° carico	95.44	0.9353	2
2° carico	384.491	3.772	8
3° carico	960.617	9.424	28

Tabella 37: Freccia misurata con il comparatore laser in seguito all'applicazione di gravi di massa nota sul transetto a distanza di 14.5 cm da bordo interno del frame.

7.4 Descrizione dei modelli agli elementi finiti

Come già accennato in precedenza la fase di taratura ha previsto la realizzazione di due modelli distinti, il primo ha permesso di avere un'idea preliminare di quello che sarebbe stato il comportamento meccanico della struttura e, una volta tarato, a messo a disposizione un numero di dati maggiore di quelli rilevati con la sensoristica per la messa a punto della seconda e più articolata simulazione.

7.4.1 Modello unidimensionale

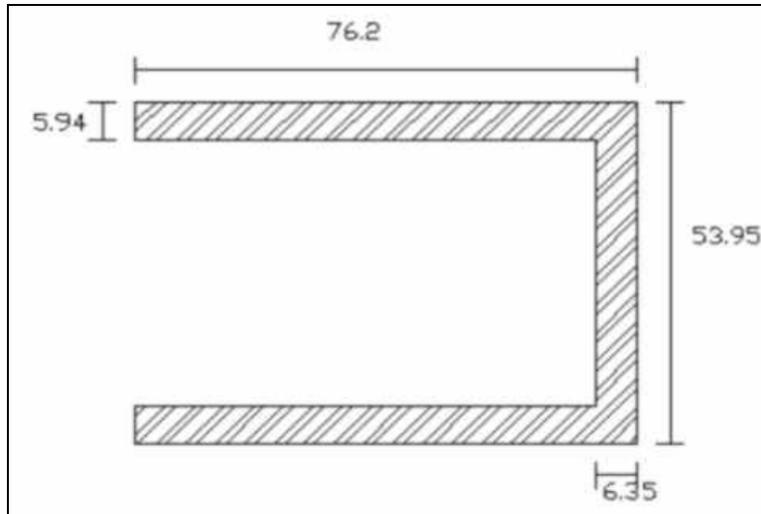


Figura 131: Sezione semplificata al FEM per la realizzazione delle basi del supporto ENEA nel modello unidimensionale.

Per questo modello si sono introdotti degli elementi “beam”, le sezioni introdotte nella definizione delle proprietà, sono state ottenute eseguendo una media ponderata con la lunghezza delle parti indicate in figura 124. La sezione complessivamente realizzata risulta essere molto semplificata, si è riportata la pianta in figura 132, in tabella 38 e 39, invece, si sono riportati i momenti di inerzia e le aree delle due sezioni.

La struttura risulta essere incastrata alle due estremità poste sul banco di taratura. I carichi applicati sono stati posti in corrispondenza dei nodi degli elementi, è stato quindi necessario avere una lunghezza delle beam tale da consentire l’esatto posizionamento delle forze. La distanza tra i carichi è quella già descritta in tabella 31, l’intensità delle forze applicate è pari a 49.05 N, si è supposto il carico essere equamente ripartito tra le due parti trasversali.

Area (mm ²)	Momento di inerzia Asse x (mm ³)	Momento di inerzia Asse y (mm ³)
1172	563707,7	690526,1

Tabella 38: Valori relativi alla sezione trasversale di fig.123.

Area (mm ²)	Momento di inerzia Asse x (mm ³)	Momento di inerzia Asse y (mm ³)
6 20000	111615,1	60444,37

Tabella 39: Valori relativi alle due sezioni longitudinali del prototipo.

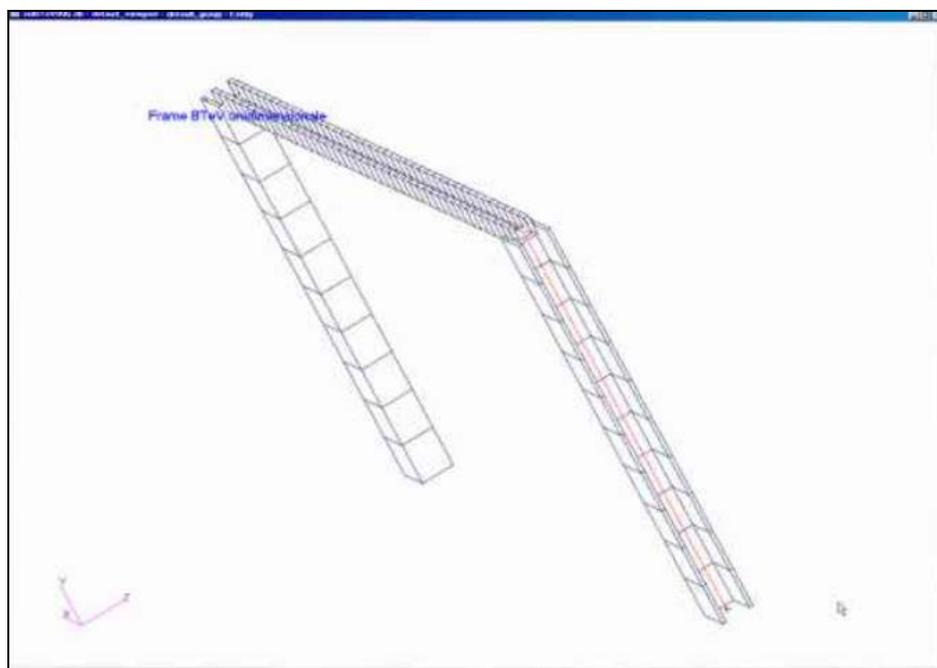


Figura 132: Schema di base del prototipo realizzato con elementi unidimensionale.

Data la semplicità della struttura, è stato possibile calcolare manualmente i momenti di inerzia delle singole travi costituenti e si è quindi direttamente verificata l'attendibilità dell'analisi FEM con il confronto con i calcoli strutturali eseguiti. In figura 134 si è riportato il modello

monodimensionale compatto di carichi⁴⁶, la necessità di realizzare questo primo semplice modello è legata alla sua maggior affidabilità e versatilità.

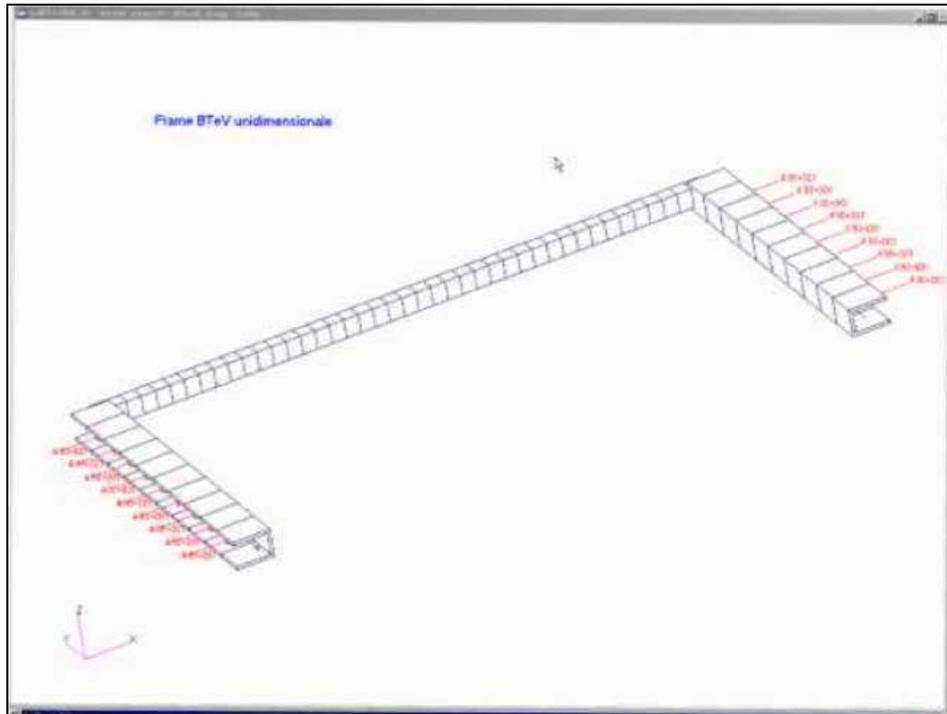


Figura 133: Schema base, con mesh ed effetto 3D, del modello unidimensionale agli elementi finiti, le frecce in rosso rappresentano le forze simulanti i carichi dei pacchetti di straws, la struttura è vincolata sui due tronconi liberi con degli incastrati applicati alle due basi.

In figura 135 si è riportata la deformata conclusiva della simulazione, trattandosi di sollecitazione di tipo statico sembra abbastanza normale che la struttura si deformi così. Una forza costante nel tempo con direzione trasversale all'asse della sezione e verso diretto al centro della stessa, non tende a deformare gli angoli del sistema meccanico a cui è applicata ma solo i lati. Questo è proprio quello che succede nel caso in esame, come si può notare dalla figura, nelle parti di raccordo tra il transetto e le parti trasversali si ha solo una rotazione rigida della struttura senza modifiche dell'ampiezza angolare.

⁴⁶ L'interfaccia Patran permette di visualizzare le proprietà delle beam in 3-D per i modelli unidimensionale.

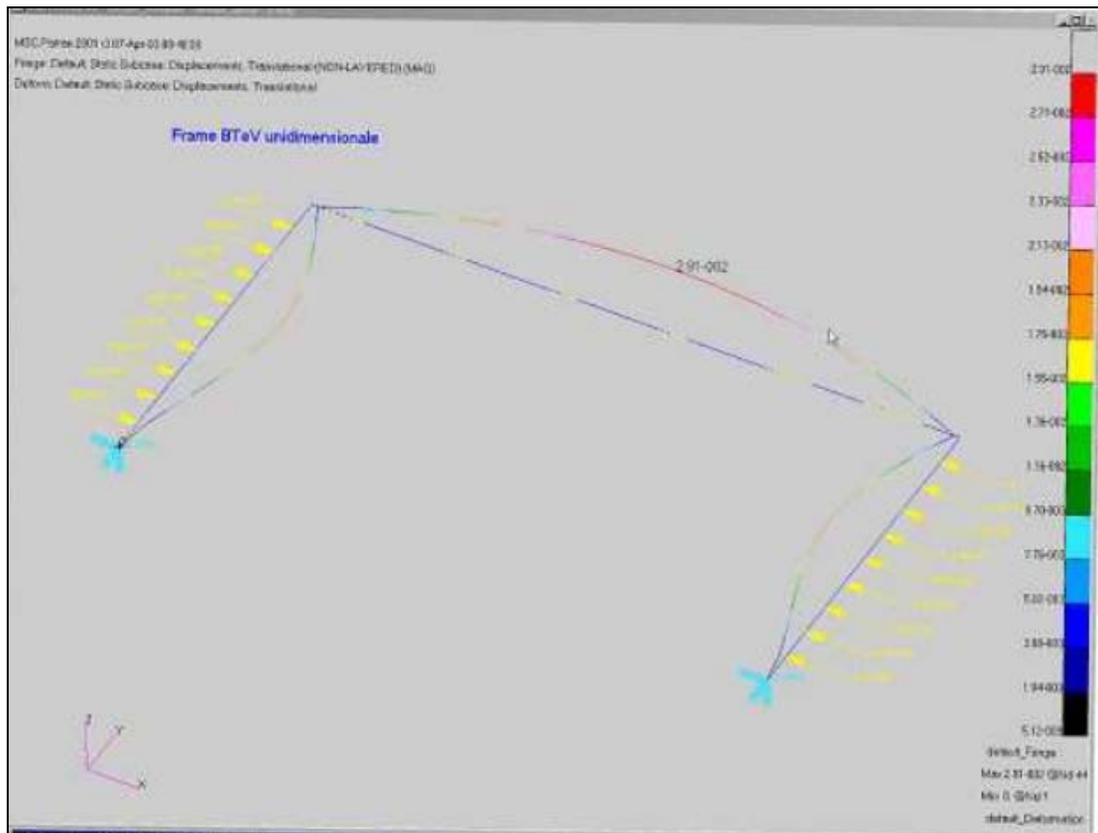


Figura 134: Analisi finale del modello agli elementi finiti del caso unidimensionale.

Realizzato il modello unidimensionale si è passato a validarlo con i dati relativi alle deformazioni misurate sul banco di testing, per effettuare la taratura vera e propria si è operato in modi diversi. In un primo momento si sono variate le proprietà meccaniche del materiale, in particolare si è variato il valore del modulo elastico, questa fase però non ha portato i risultati sperati; si è allora passato a rieseguire la mesh all'intera struttura ed a modificare le sezioni impostate, la sezione precedentemente presentata in figura 132 è stata ottenuta partendo da una differente sezione e applicando le modifiche suddette. Ottenuta la congruenza tra dati sperimentali e analisi al FEM si è passato alla verifica del modello partendo dai risultati di tabella 28 relativi alla

applicazione di carichi nella sezione di transetto, la corrispondenza anche di queste deformazioni ha permesso di ritenere tarato questo primo modello.

7.4.2 Modello 3-D

La descrizione delle sezioni del modello tridimensionale è la stessa vista per l'analisi comparata tra soluzione americana ed italiana dell'interfaccia, si riporta comunque di seguito una foto di una delle sezioni del prototipo reale, figura 136, con la corrispondente riproduzione al FEM, figura 137, per far vedere la corrispondenza tra le due geometrie. Secondo quanto fatto per la realizzazione del modello monodimensionale, anche in questo caso si sono supposte incastrate le due sezioni a contatto con il banco di lavoro.

I carichi sono stati applicati sui nodi degli Hexa ottenuti per estrusione di una preliminare mesh di base, per avere coincidenza tra la posizione dei loads applicati al prototipo e quelli riprodotti sul calcolatore è stato necessario controllare la dimensione degli elementi prodotti con lo "sweep". Un attento controllo delle dimensioni degli elementi è stato quindi necessario sia per gli Hexa del transetto, in particolare si è dovuto avere almeno un nodo a distanza di 14,5 cm dal bordo interno, sia lungo le sezioni verticali, in questo caso il controllo degli elementi estrusi è stato più rigoroso dal momento che erano presenti più sollecitazioni a distanze diverse tra loro.

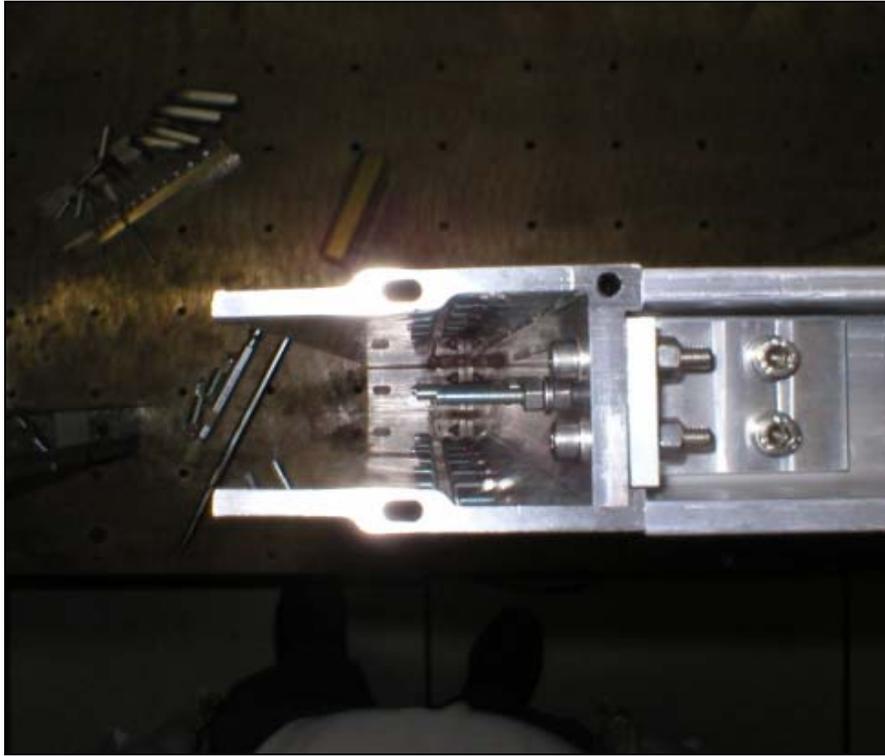


Figura 135: Sezione reale del prototipo montato presso i laboratori dell'ENEA di Frascati.

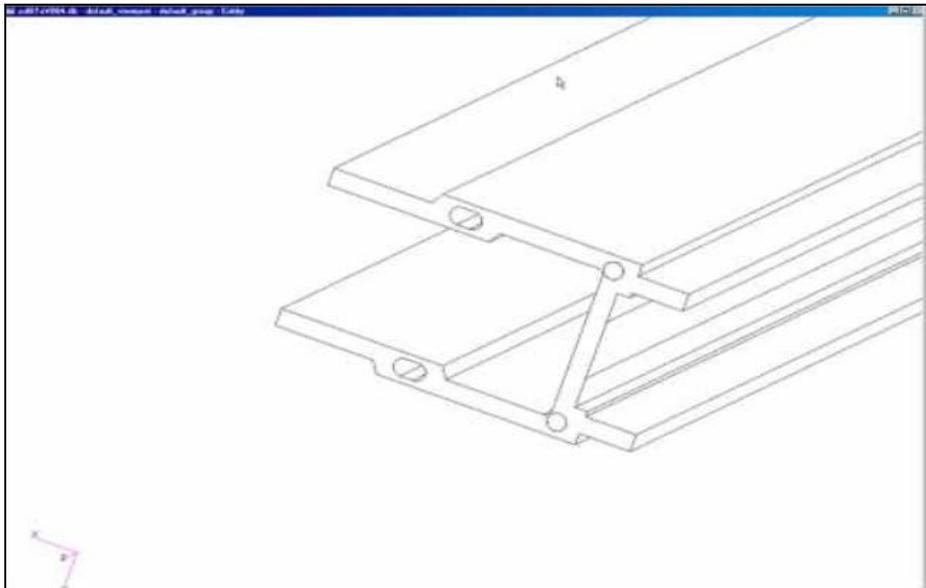


Figura 136: Sezione virtuale realizzata al FEM del prototipo montato presso i laboratori dell'ENEA di Frascati.

Realizzata la geometria e la corrispondente mesh con i vincoli ed i carichi e eseguita l'analisi si è passato a tarare anche questo modello. In accordo a quanto fatto in precedenza si sono presi dei carichi di riferimento, nel caso in questione si sono considerati i dati relativi alle masse applicate al transetto riportate in tabella 37 rilevati con il comparatore ottico. Si è fatto in modo che i valori reali coincidessero con quelli dell'analisi, è stato possibile fare questo modificando il modulo elastico e rivedendo la dimensione degli elementi.



Figura 137: Riproduzione al FEM con elementi tridimensionali del supporto ENEA completo di vincoli e carichi.

Si è passato a verificare la taratura confrontando le misure del comparatore relativi alle deformazioni della struttura dovute all'applicazione dei carichi di trazione applicati dalle molle. Un ulteriore test di verifica è stato quello di verificare gli spostamenti assiali delle parti del frame, in questo caso i dati di riferimento sono stati quelli delle misure eseguite con le fibre ottiche e riportati

in tabella 35. Un'ulteriore verifica della bontà della taratura è stata fatta applicando le stesse sollecitazioni meccaniche sia al modello unidimensionale che al 3-D e confrontando le deformazioni subite dai due modelli. Come sottolineato anche in precedenza, il vantaggio di avere un modello virtuale in 3-D deriva dalla necessità di dover applicare alla struttura meccanica anche dei carichi non posti lungo l'asse della struttura. In questo modo, infatti, si eviterebbe di eseguire complessi calcoli vettoriali miranti a scomporre vettorialmente le forze secondo coordinate passanti per l'asse del sistema.

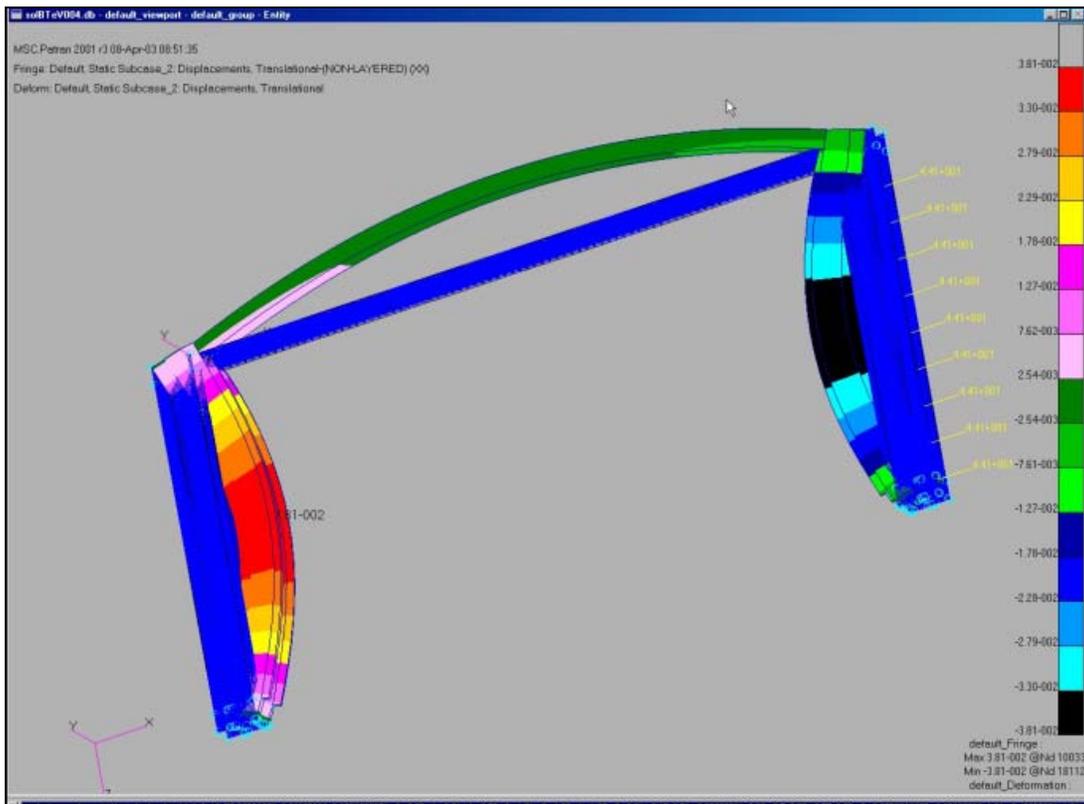


Figura 138: Deformata relativa al prototipo virtuale del supporto ENEA, nella simulazione al FEM realizzata si è sottoposta la struttura al carico di trazione delle nove molle.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- R. E. Thomas, J. W. Gibson, G. A. Haas and R. H. Abrams, Jr., "Thermionic Sources for High-Brightness Electron Beams," IEEE.
- J. L. Cronin, "Modern Dispenser Cathodes," IEEE Proc.
- L. R. Falce and G. S. Breeze, "CPD Cathodes for High-Resolution CRTs," SID 91 Digest.
- M. G. Fontana, "Corrosion Engineering", McGraw-Hill.
- B. Harris, "Engineering composite materials", Institute of Metals (London).
- AA.VV., "Engineers Plastics", ASM International.
- G. E. Dieters, "Mechanical metallurgy", McGraw-Hill.
- W. F. Smith, "Structure and properties of engineering alloys", McGraw-Hill.
- R. McWeeny, "Coulson's valence", Oxford university Press.
- R. Kuzschke "BTeV: Lepton, Hadron and Photon ID", Wiley.
- V.A. Kachanov , "Light source for energy stabilization of calorimeter detectors based on photodetectors", McGraw-Hill.
- W.N. Cottingham e D.A. Greenwood, An introduction to the standard model of particle physics, Cambridge University press
- Konrad Kleinknecht, "Detector for particle radiation", Cambridge University press.
- V. A. Batarin et al. "Precision Measurement of energy and position resolution of the BTeV Electromagnetic Calorimeter Prototype", Addison-Welsley.
- CMS, "The electromagnetic calorimeter project technical design report", Addison-Welsley.
- R. Aleksan, I Dunietz, B. Kaiser "Determining the CP violation phase γ ", Wiley.
- Fasso et al., "FLUKA: present status and future development" La Biodola (Elba)
- AA. VV., "A low walk double threshold discriminator for gas tracking devices", LNF-01/001(P).
- L. Benussi et al, "nuclear instrument and method", LNF A 419.
- AA. VV., "Higt performance tracking with long straw tubes using dimethyl ether", LNF-94/047 (IR).

C.Kittel, "Introduzione alla fisica dello stato solido", Bollati Boringhieri.

J.F. Nye, "Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices", Oxford.

J. C. Slater, "Introduction to chemical physics", McGraw-Hill.

P.A. Aario et al, "FLUKA user guide", La Biodola (Elba)

O. Belluzzi, "Scienza delle costruzioni", Zanichelli.

J. Dasko, "Material properties and manufacturing processes", John Wiley and Sons.

K. H. "Maschinenelemente", Carl Hanser Verlag, Munchen.

Ghizzetti, F. Rosati, "Analisi matematica", Masson.

T. Von Barman, M. A. Biot, „Mathematical methods for engineering“, McGraw-Hill.

Branca, "Misure meccaniche , termiche e collaudi", McGraw-Hill.

H. Abramovick et al., 'Nuclear instrument method', McGraw-Hill.

W. W. M. Allison, 'Physic Scripta', ASM International.

M. V. Babykin, "Sov. J. Atomic Energy IV", Wiley.

J. Bakken et al., 'Nuclear instrument methods', McGraw-Hill.

H. A: Bethe, "Annalen d. Physik", McGraw-Hill.

M. Conversi and A. Gozzini, "Nuovo chimica"

T. Y. Canby, "Advanced material reshaping our lives", Nat. Geor.

AA. VV., "Engineered materials handbook", ASM International.

P. Lecomte et al., 'Physic scripta', Addison-Welsley.

V. Radeky, 'IEEE trans', ASM International.

PEP-4 collaboration, "Proposal to modify the time project chamber in order to eliminate track distortions"

B. Rossi, "High energy particles", McGraw-Hill.

J. I. Trnmbka et al., 'Astrophys'

W. Price, "Nuclear radiation detection", McGraw-Hill.

Hellbaum, R.F., Bryant, R.G., Fox, R.L., Jalink, A., Rohrbach, W.W., and Simpson, J.O., Thin Layer Composite

Unimorph and Ferroelectric Driver and Sensor, U.S. Patent 5,632,840, May 27, 1997.

Bryant, R.G., "Thunder Actuators", 5th Annual Workshop: Enabling Technologies for Smart Aircraft Systems, NASA.

Langley Research Center, May 14-16, 1996.

Pinkerton, J.L. and Moses, R.W., "A Feasibility Study to Control Airfoil Shape Using THUNDER", NASA TM-4767.

D.E. Dausch and S.A. Wise, "Compositional Effects on Electromechanical Degradation of RAINBOW Actuators", NASA-TM 206282.

D.E. Dausch, "Ferroelectric Polarization Fatigue in PZT-Based RAINBOWs and Bulk Ceramics", J.Am.Ceram.Soc. 80.

C.C. Hsueh, T. Tamagawa, C. Ye, A. Helgeson and D.L. Polla, Sol-Gel Derived Ferroelectric Thin Films in Silicon.

K.R. Udayakumar, S.F. Bart, A.M. Flynn, J. Chen, L.S. Tavrow, L.E. Cross, R.A. Brooks, and D.J. Ehrlich.

Ferroelectric Thin Film Ultrasonic Micromotors, Proc. 4 th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems.

F. R. Eisler, "Nuclear instrument methods"

H. W. Fulbright, "Ionization chambers in nuclear physics"

M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652

W. Shockley, "Electrons and holes in semiconductors", Van Nostrand, NY.

N. Cabibbo, Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 531

Hjörvarsson, J. Rydén, T. Ericson and E. Karlsson, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.

B. D. Cullity, "Elements of X-ray diffraction", Addison Wesley.

A. J. C. Wilson, "Elements of X-ray crystallography", Addison Wesley.

T. H. Courtney, "Mechanical behaviour of material", McGraw-Hill.

R. W. Herzberg, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials", Wiley.

C. D. Chafee, "The rewiring of America", Academic.

S. E. Miller, I. P. Kaminow, "optical fiber communications II", Academic.

S. M. Sze, "Semiconductor devices", Wiley.

S.D. Holmes, *et al.*, "132 nsec Bunch Spacing in the Tevatron Proton-Antiproton Collider", FERMILAB-TM-1920, December 1994.

J.A. Johnstone, "Conceptual Designs for IR Optics at C0", FERMILAB-TM-2122, August 2000.

J.A. Johnstone, "C0 Low β Optics", FERMILAB-TM-2139, 2000.

K. K. Chawla, "Composite materials", ASM International.

R. Kessler, et al., Beam test of a Prototype CsI Calorimeter, Nucl. Instr. Meth.

R. Yarema et al., A High Speed, Wide Dynamic Range Digitizer Circuit for Photomultiplier tubes, Proceedings of the 6th Pisa Meeting on Advanced Detectors, La Biodola, Isola d'Elba, Italy.

P. Silvestroni, "Fondamenti di chimica", Masson

T. Zimmerman and M. Sarraj, A Second Generation Integrator and Encoder ASIC, IEEE Trans. on Nucl. Sci.

A. Baumbaugh, Production Testing Issues for Front-End ASICs for High Energy Physics, these proceedings.

M. Flemings, "Solidification processing", McGraw-Hill.

W. F. Smith, "Scienza e tecnologia dei materiali", McGraw-Hill.

B. D. Cullity, "Introduction to magnetic materials", Addison-Wesley.

AA. VV., "MSC/Nastran, handbook for linear analysis", The MacNeal-Schwendler Corporation.

AA. VV., "MSC/Nastran, handbook for dynamic analysis", The MacNeal-Schwendler Corporation.

M.T. Payne and C.P. Rader, "Elastomer Technology Handbook", CRC Press.

.AA. VV., "MSC/Nastran, theoretical manual", The MacNeal-Schwendler Corporation.

"Rohacell Technical Information," Rohm Tech Inc.

Young, W, Roark's Formulas for Stress and Strain, sixth edition, McGraw-Hill..

AA. VV., "Review of particle properties", McGraw-Hill.

A.Pignataro, "Scienza delle costruzioni", Masson.

www-pat.fnal.gov/mcfast.html.

www-btev.fnal.gov/public_documents

www.home.fnal.gov

www.Rohacell IG.htm

www.infn.it

www.fermilab.com